



Pedro Miguel Perdigão Venâncio

Licenciado em Engenharia Geológica

**Contributo para a modelação do estudo
do comportamento de barragens de
aterro com o auxílio de redes neuronais
artificiais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

A presente dissertação foi preparada no Laboratório Nacional de Engenharia
Civil (LNEC) no âmbito do protocolo existente entre a FCT-UNL e o LNEC

Orientador: Doutor João Manuel Marcelino, LNEC
Co-orientador: Doutora Ana Paula da Silva, GeoBioTec e FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor José António de Almeida
Arguente(s): Doutor João Candeias Portugal
Vogal(ais): Doutor João Manuel Marcelino



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2015

Pedro Miguel Perdigão Venâncio

Licenciado em Engenharia Geológica

**Contributo para a modelação do estudo do
comportamento de barragens de aterro com o auxílio
de redes neuronais artificiais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica
(Geotecnia)

A presente dissertação foi preparada no Laboratório Nacional de Engenharia
Civil (LNEC) no âmbito do protocolo existente entre a FCT-UNL e o LNEC

Orientador: Doutor João Manuel Marcelino Mateus da Silva, LNEC
Co-orientador: Doutora Ana Paula da Silva, GeoBioTec e FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutor José António de Almeida
Arguente(s): Doutor João Candeias Portugal
Vogal(ais): Doutor João Manuel Marcelino

Junho 2015

Contributo para a modelação do estudo do comportamento de barragens de aterro com o auxílio de redes neuronais artificiais

Copyright@ Pedro Miguel Perdigão Venâncio, 2015

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao LNEC pelos dados fornecidos para a realização desta dissertação, na pessoa do Eng.º João Marcelino, Chefe do Núcleo de Geotecnia de Obras Hidráulicas. Sem estes dados o trabalho proposto não poderia ter sido feito. Agradeço-lhe também a agilidade demonstrada durante a escolha do tema da presente dissertação. Um agradecimento especial às Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro pelos dados fornecidos que permitiram atingir o objetivo principal desta dissertação.

Em segundo lugar, agradeço a todos os meus familiares, em particular, a minha irmã Inês e ao meu irmão Zé, amigos e “inimigos” que de uma maneira ou de outra fizeram parte da minha caminhada até aqui. Refiro-me a todos aqueles que conheci ao longo do meu curto período de vida e que, através de vivências e partilhas de conhecimento, foram peça fundamental na construção da pessoa que hoje sou. Agradeço ao Gaio, ao Bruno e à Laura por me terem aturado e apoiado durante todo o mestrado, um grande abraço aos respetivos e um beijinho para a respetiva. Sem os 4 da Teresa não sei se teria chegado até aqui.

Quero agradecer, de uma maneira especial, aos meus orientadores. Foram eles a principal ajuda na aquisição dos conhecimentos para conseguir atingir os objetivos propostos. À Doutora Ana Paula Silva pelo rigor, conhecimento, incentivo e espírito crítico transmitidos, que possibilitaram a estruturação da dissertação e de todos os conhecimentos que a compõem. Ao Doutor João Marcelino pela motivação, conhecimento e espírito crítico transmitidos e que permitiram atingir os objetivos principais desta dissertação.

Por último queria agradecer ao “combustível” desta dissertação: os meus Pais. Devido ao esforço, trabalho e dedicação deles, que nas suas vidas trabalharam e trabalham para que eu e os meus irmãos possamos ter o futuro mais risonho possível. Agradeço-lhes todo o esforço que possibilitou a minha chegada até aqui.

E como não podia deixar de ser, queria agradecer à Mariana por ter aturado todas as fases de elaboração pela qual uma tese passa. A ela, especialmente, por todo o amor que me tem dado na vida desde que estamos juntos, um muito obrigado.

Um obrigado a todos!

A Deus, à Avó Bumbá e ao
Tio Carlos

Resumo

O conhecimento do comportamento das barragens de aterro é essencial para garantir o seu funcionamento adequado e para que os objetivos de utilização delineados inicialmente para o respetivo aproveitamento hidráulico possam ser cumpridos. Os fatores de maior relevância num estudo deste tipo de barragens, considerando que apenas estão sob solicitações estáticas, são as pressões de água, registadas em piezómetros, os caudais percolados e os deslocamentos superficiais, geralmente medidos em marcas de nivelamento ou em alvos colocados em peças de contragem forçada. Na presente dissertação pretende-se, com base no conhecimento dos registos dessas medições feitas anteriormente e recorrendo a modelos de inteligência artificial, predizer o valor que se obterá em próximas medições, ajudando assim a decidir qual o melhor procedimento para remediar ou tratar um problema de comportamento relacionado com as variáveis em estudo.

Esta dissertação divide-se essencialmente em três partes. Primeiramente, introduzem-se os conceitos relativos à segurança de barragens de aterro, de acordo com o regulamento de segurança adotado em Portugal, dando relevo ao tipo de observação a que são submetidas. Seguidamente, introduz-se o conceito de redes neuronais artificiais e apresenta-se a base de dados, criada com o intuito de uniformizar e melhorar a organização dos valores em estudo das barragens de aterro, que têm sido acompanhadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Com esta pretende-se facilitar a utilização destes elementos por programas de inteligência artificial. Por último, é feito o enquadramento de um caso de estudo, uma barragem de aterro no Norte de Portugal – barragem de Valtorno-Mourão. Utilizando o *Neuroph Studio*, os dados relativos à observação desta barragem são aplicados numa rede neuronal artificial, *Multi Layer Perceptron Backpropagation Neural Network*, permitindo antever comportamentos futuros. Os resultados obtidos são discutidos e perspectivam-se trabalhos para continuar a desenvolver a investigação efetuada.

Palavras-chave: Barragens de aterro, redes neuronais artificiais, previsão do comportamento, instrumentação, *Multi Layer Perceptron Backpropagation Neural Network*

Abstract

The knowledge of the behavior of the embankment dams is essential to guarantee their proper operation as well as to accomplish the initial outlined objectives to achieve the hydraulic development.

Taking into consideration the embankment dams behavior under static requests, the most relevant magnitudes for the study of this type of dams are: the water pressures, registered with piezometers, the seepage flow and surface displacements, usually measured in leveling marks or targets placed with precision centering.

The aim of this thesis is to predict the value of future measurements of the magnitudes mentioned above using artificial intelligence models which use past records of these measurements. This will be helpful to decide which the best procedure is to repair or solve a problem/malfunction related to the studied variables.

This thesis has three main parts. Firstly, the embankment dams security concepts are explained according to the safety regulation prevailing in Portugal, highlighting the type of monitoring techniques and equipment which is employed. Secondly, the concept of artificial neural networks is introduced and explained, as well as the database created with the aim of standardize and organize the studied data of the embankment dams accompanied by the Laboratório Nacional de Engenharia Civil. The database is essential to facilitate the use of the measurements data by the artificial intelligence programs. In the last part, a case-study regarding the Valtorno-Mourão dam, which is an embankment dam in the north of Portugal, is presented. Using the *Neuroph Studio* the dam's observational data collected is applied in an artificial neural network, the *Multi Layer Perceptron Backpropagation Neural Network*. This allows the prediction of the future behavior of this dam. The achieved results are discussed and some future works are outlined in order to continue the conducted research.

Keywords: Embankment dams, Artificial Neural Networks, Behavioral Prediction, Instrumentation, *Multi Layer Perceptron Backpropagation Neural Network*

Índice

| | |
|---|----|
| Índice..... | xi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Breve enquadramento do tema..... | 1 |
| 1.2 Justificação e objetivos da dissertação | 4 |
| 1.3 Estrutura | 5 |
| 2 Observação do comportamento de barragens de aterro..... | 7 |
| 2.1 Tipo de barragens de aterro | 7 |
| 2.2 Observação do comportamento | 9 |
| 2.3 Modelos de previsão do comportamento..... | 13 |
| 2.3.1 Modelos conceptuais | 13 |
| 2.3.2 Modelos empíricos | 14 |
| 2.3.3 Modelos matemáticos..... | 14 |
| 2.3.3.1 Modelos determinísticos | 14 |
| 2.3.3.2 Modelos estatísticos (semi-empíricos) | 15 |
| 2.3.3.3 Modelos híbridos..... | 15 |
| 2.3.4 Limitações | 15 |
| 3 Metodologia | 17 |
| 3.1 Enquadramento..... | 17 |
| 3.2 Redes Neuronais Artificiais e <i>Multi Layer Perceptron Backpropagation</i> | 19 |
| 3.2.1 Redes Neuronais Artificiais (RNA) | 19 |
| 3.2.2 <i>Multi Layer Perceptron Backpropagation</i> (MLPBP)..... | 21 |
| 3.2.2.1 Critérios de paragem do treino | 22 |
| 3.2.2.2 Variáveis que controlam aprendizagem da RNA | 23 |
| 3.3 Base de dados realizada..... | 24 |
| 3.3.1 A organização dos dados | 25 |
| 3.3.2 Descrição da base de dados | 25 |
| 3.3.2.1 Tabelas | 26 |
| 3.3.2.2 Consultas pré-definidas | 28 |
| 3.3.2.3 Relatórios | 31 |
| 3.3.3 Limitações do <i>software Access</i> ® | 32 |
| 4 Caso de estudo..... | 33 |
| 4.1 Barragem Valtorno-Mourão | 33 |
| 4.1.1 Descrição geral..... | 33 |
| 4.2 Aplicação das Redes Neuronais Artificiais (RNA) aos registos de observação..... | 36 |
| 4.2.1 Valores de pressão de água | 37 |
| 4.2.1.1 Resultados | 38 |
| 4.2.2 Valores de caudais..... | 41 |
| 4.2.2.1 Resultados | 41 |
| 4.2.3 Valores de deslocamentos superficiais..... | 42 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5 | Considerações finais..... | 47 |
| 5.1 | Síntese | 47 |
| 5.2 | Discussão e análise dos resultados | 47 |
| 5.3 | Trabalhos futuros..... | 51 |
| | Referências bibliográficas | 53 |
| | ANEXOS..... | 55 |
| | ANEXO I – Perfis transversais com a localização dos piezómetros na barragem e esquema dos medidores de caudais | |
| | ANEXO II - Estrutura e organização da base de dados | |
| | ANEXO III – Gráficos valores medidos <i>versus</i> valores calculados para os caudais, cada piezómetro, e cada marca superficial | |
| | ANEXO IV - Comparação entre valores medidos e valores calculados através dos gráficos de dispersão | |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Diagrama de dois tipos genéricos de classificação de barragens de aterro | 7 |
| Figura 3.1 - Aspeto da aplicação da RNA – <i>Multi Layer Perceptron Backpropagation</i> com a operação lógica “OU exclusivo” no <i>Neuroph Studio</i> | 19 |
| Figura 3.2 - Fluxograma do funcionamento de uma rede neuronal MLPBP | 22 |
| Figura 3.3 – Efeito da variação da MT na obtenção do mínimo global | 24 |
| Figura 3.4 - Relações das tabelas da base de dados dos piezómetros | 25 |
| Figura 3.5 - Relações das tabelas da base de dados das marcas superficiais | 26 |
| Figura 3.6 - Menu tabelas da base de dados piezómetros | 26 |
| Figura 3.7 Tabela “Barragens” – base de dados piezómetros | 26 |
| Figura 3.8 - Seleção por barragem – exemplo da organização das barragens na base de dados | 27 |
| Figura 3.9 - Seleção por data – exemplo da organização das datas da base de dados..... | 27 |
| Figura 3.10 - Menu consultas de base de dados piezómetros | 28 |
| Figura 3.11 - Consulta Dados Piezómetros - dados técnicos dos piezómetros | 28 |
| Figura 3.12 - Resultado exemplo da consulta Dados Piezómetros | 29 |
| Figura 3.13 - Resultado exemplo da consulta Normalizar | 29 |
| Figura 3.14 - Definição da função N em Visual Basic®..... | 30 |
| Figura 3.15 - Consulta Marcas_dados Consulta – dados das Marcas superficiais | 30 |
| Figura 3.16 - Resultado exemplo da consulta Marcas_dados Consulta | 30 |
| Figura 3.17 - Relatório exemplo – “Dados Piezómetros” | 31 |
| Figura 3.18 - Relatório exemplo – “NormalizarDados”..... | 31 |
| Figura 3.19 - Relatório exemplo – “Assentamentos medidos pelas marcas superficiais” | 32 |
| Figura 4.1 - Imagem aérea da barragem de Valtorno-Mourão | 33 |
| Figura 4.2 - Perfil transversal tipo da barragem de Valtorno-Mourão - sem escala..... | 34 |
| Figura 4.3 - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 6/4 – após subdivisão por localização | 37 |
| Figura 4.4 - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 8/3 – AB após o tratamento | 39 |
| Figura 4.5 – Comparação entre valores medidos e valores calculados para o piezómetro PH 8/3 – AB após o tratamento | 39 |
| Figura 4.6 - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 2/4 – ACM..... | 39 |
| Figura 4.7 - Comparação entre valores medidos e valores calculados para o piezómetro PH 2/4 – ACM | 40 |
| Figura 4.8 - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para os caudais medidos após o tratamento da fundação | 41 |
| Figura 4.9 - Comparação entre valores medidos e valores calculados para os caudais medidos após o tratamento da fundação | 41 |
| Figura 4.10 - Planta da barragem de Valtorno-Mourão com o referencial adotado, as marcas superficiais e os pontos de referência – sem escala..... | 43 |
| Figura 4.11 - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para a marca superficial: Ms3/j | 44 |
| Figura 4.12 - Comparação entre valores medidos e valores calculados para a marca superficiais Ms3/j | 44 |
| Figura 4.13 - Contour plot dos resultados das previsões dos assentamentos para 01 de Março de 2015 | 45 |
| Figura 5.1 – Exemplo - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 8/4 – AB até ao tratamento..... | 49 |
| Figura 5.2 – Exemplo - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 4/5 – ACJ até ao tratamento..... | 49 |
| Figura 5.3 – Exemplo - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 4/3 – ACJ após o tratamento..... | 50 |
| Figura 5.4 – Exemplo - <i>Output versus Desired Output</i> - DO para o piezómetro PH 1/5 – FCM | 50 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 - Estatística global das falhas ocorridas em barragens de aterro a nível internacional - com exceção das construídas na China e todas as anteriores a 1930 no Japão | 3 |
| Tabela 1.2 – Estatística global dos incidentes devidos a fenómenos de erosão interna e respetiva fase de vida da barragem em que ocorreram | 4 |
| Tabela 2.1 – Tipos de barragens de aterro de acordo com a classificação exemplo genérica descrita no documento da Agência Nacional de Águas..... | 8 |
| Tabela 2.2 – Barragens de aterro com elementos artificiais na sua constituição | 9 |
| Tabela 2.3 – Inspeção visual: alterações a inspecionar em cada órgão constituinte de uma barragem de aterro | 11 |
| Tabela 2.4 – Inspeção visual: alterações na envoltória e nos órgãos anexos de uma barragem | 12 |
| Tabela 2.5 – Monitorização do comportamento em barragens de aterro: parâmetros significativos a controlar | 13 |
| Tabela 4.1 - Dados técnicos dos piezómetros instalados na barragem de Valtorno-Mourão..... | 35 |
| Tabela 4.2 - EQM dos valores calculados <i>versus</i> valores medidos para os dados dos piezómetros | 38 |
| Tabela 4.3 – Previsão dos valores de pressão de água registados pelo piezómetro PH 2/4 para o ano de 2015..... | 40 |
| Tabela 4.4 - Previsão dos valores de caudais totais registados pelo medidor de caudais para o ano de 2015..... | 42 |
| Tabela 4.5 - EQM dos valores calculados <i>versus</i> valores medidos para os dados das marcas superficiais | 42 |
| Tabela 4.6 – Coordenadas dos pontos de referência e marcas superficiais com base no referencial adotado | 43 |

Abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e siglas

| | |
|-----------------|---|
| <i>op. cit.</i> | <i>opus citatum</i> (obra citada) |
| <i>et al.</i> | <i>et alia</i> (e outros) |
| <i>apud</i> | do latim; significa: “junto a”, “com”, “em” |
| <i>in press</i> | submetido para impressão |
| <i>input</i> | entrada |
| <i>Output</i> | saída |
| <i>software</i> | programa |
| AB | Aterro Banqueta |
| ACJ | Aterro Coroamento Jusante |
| ACM | Aterro Coroamento Montante |
| EQM | Erro Quadrático Médio |
| FB | Fundação Banqueta |
| FCJ | Fundação Coroamento Jusante |
| FCM | Fundação Coroamento Montante |
| GNU | Acrónimo recursivo de: <i>GNU is Not Unix</i> – GNU Não é Unix |
| ICOLD | <i>Internacional Comission on Large Dams</i> (Comissão Internacional para as Grandes Barragens) |
| LR | <i>Learning Rate</i> |
| LNEC | Laboratório Nacional de Engenharia Civil |
| MLPBP | <i>Multi Layer Perceptron Backpropagation</i> (Perceptrão multicamada de retropropagação) |
| MT | <i>Momentum Term</i> |
| NAA | Nível de Água de Albufeira |
| NMC | Nível de Máxima Cheia |
| NPA | Nível de Pleno Armazenamento |
| RSB | Regulamento de Segurança de Barragens |
| RNA | Redes Neuronais Artificiais |
| XOR | Operação Lógica <i>OU exclusivo</i> |

Símbolos

| | |
|---|-----------------|
| ® | marca registada |
|---|-----------------|

1 Introdução

1.1 Breve enquadramento do tema

Atualmente e à medida que a sociedade vai evoluindo, as necessidades energéticas vão sendo cada vez maiores. Por essa razão procura-se, todos os dias, disponibilizar mais fontes de produção de energia e, sempre que possível, fontes renováveis. Uma destas fontes de energia renovável são os aproveitamentos hidroelétricos.

As barragens daqueles aproveitamentos podem ser classificadas com base nas variadas funções para as quais podem ser desenvolvidas, tais como o armazenamento, desvio, aprisionamento ou então combinações das anteriores, o que é cada vez mais frequente. Quando a barragem é utilizada com a função de armazenar, o intuito é esta funcionar para: abastecimento de água, recreio, pesca, produção de energia hidroelétrica, irrigação, etc. Quando se diz que a barragem é feita para o desvio, está a dizer-se que esta irá servir essencialmente para levar água para zonas onde esta não existe ou é de difícil obtenção. Quando esta é construída com a função de regularização de caudais, serve essencialmente para o controlo de cheias nas populações a jusante da barragem ou para o armazenamento com vista a uma utilização numa altura de seca. Mas, tal como referido, é cada vez mais frequente construir as barragens com fins múltiplos, de maneira a que se possa rentabilizar ao máximo o investimento que implicam.

Para além desta classificação, podem também classificar-se as barragens consoante a solução de impermeabilização ou o tipo de material que as compõe.

De uma maneira geral, as barragens dividem-se em dois grandes grupos: as barragens de betão; e as barragens de aterro. Tal divisão faz-se independentemente da sua função e apesar de existirem várias outras maneiras de as classificar e organizar. Às vezes, em situações muito específicas, pode existir uma combinação dos dois tipos, contudo, tanto as barragens de betão como as barragens de aterro são construídas principalmente com dois objetivos: produção de energia e abastecimento de água. Nesta dissertação serão exclusivamente analisadas algumas barragens de aterro, assim designadas por serem essencialmente compostas por solos, misturas de solos, e/ou fragmentos de rocha.

O desenvolvimento de um empreendimento tal como uma barragem, passa por várias fases, podendo-se considerar como principais as seguintes: projeto, construção, primeiro enchimento, primeira etapa de exploração – os primeiros 5 a 6 anos de vida da barragem, e a fase de exploração. Existindo vários problemas associados a cada uma destas fases que têm grande influência no futuro e no respetivo funcionamento, a *Internacional Commission on Large Dams* - Comissão Internacional para as Grandes Barragens (ICOLD) e outras entidades ligadas ao estudo e observação de grandes barragens têm vindo a desenvolver estudos e regras que permitem controlar de uma forma mais eficaz possíveis acidentes ou falhas que têm vindo a ocorrer nestas estruturas.

Em Portugal, as grandes barragens são definidas e regulamentadas no “Regulamento de Segurança de Barragens” – RSB, decreto-lei 344/2007 (Ministério das obras públicas, transportes e comunicações, 2007). O RSB tem como objetivo reger a segurança das barragens durante as suas várias fases de conceção, desde a fase de projeto ao abandono, passando por todas as fases intermédias já mencionadas. Este regulamento aplica-se a: “*todas as barragens de altura igual ou superior a 15 metros, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até à cota do coroamento, ou a barragens de altura igual ou superior a 10 m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm³ (...) As barragens de altura inferior a 15 metros que não estejam incluídas na alínea anterior e cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 100000 m³.*” Ainda dentro deste regulamento podem ser incluídas outro tipo de barragens que sejam consideradas parte de uma classe do regulamento, escolhidas através de um “*resultado da aprovação de projetos ou estudos ou de estudos de avaliação de segurança*” (*op. cit.*).

As barragens são incluídas em classes em função dos danos potenciais que estão associados a elas. Existem três classes, por ordem decrescente da gravidade dos danos. A classificação é feita com base no potencial afetado de vários fatores em caso de falha, são eles: I - vidas humanas; II – bens; III- ambiente.

O RSB define:

- acidente é “a ocorrência excecional cuja evolução não controlada é suscetível de originar uma onda de inundação” (op. cit.);
- incidente é “a anomalia suscetível de afetar, a curto ou longo prazo, a funcionalidade da obra e que implica a tomada de medidas corretivas” (op. cit.);
- catástrofe é “a ocorrência excecional que provoca vítimas e danos sociais, materiais e ambientais, ultrapassando a capacidade da comunidade atingida para lhe fazer face” (op. cit.).

A ICOLD apresenta um estudo acerca das barragens de aterro, onde define falhas/fracassos, acidentes e incidentes. Esta recolha de informação feita pela ICOLD (1974, 1995) é a última a nível internacional até à data de discussão da dissertação. Neste documento, a ICOLD (1974, 1995) divide os acidentes em três tipos – adaptado de Fell et al. (2014):

- A1 – acidente que ocorre na primeira etapa de exploração da barragem, mas onde é evitado o avanço para o insucesso, tomando medidas de remediação imediatas que, em último caso, podem ser o esvaziamento rápido da respetiva albufeira.
- A2 – acidente que ocorre durante o primeiro enchimento, mas onde é evitado o avanço para o insucesso, adotando medidas de remediação imediatas que, em último caso, podem ser o esvaziamento rápido da albufeira.
- A3 – acidente durante a construção da barragem, que foi sinalizado e reparado antes de qualquer enchimento ter sido efetuado.

A ICOLD (1974, 1995) descreve, ainda, uma falha/fracasso como um colapso ou movimento de parte da barragem ou da sua fundação, que impede a barragem de cumprir a sua principal função, que é represar a água. Normalmente, quando há um acontecimento deste tipo, existe uma libertação de água em quantidades significativas, o que leva a um risco elevado para as populações e estruturas situadas a jusante da barragem. As falhas podem ser divididas em dois tipos:

- F1 – Uma falha de escala grande, que leva ao completo abandono da barragem.
- F2 – Uma falha que provocou bastantes danos quando ocorreu, mas que mesmo assim, permite que a barragem seja reparada para voltar ao seu pleno funcionamento.

Como incidentes são considerados todo o tipo de acidentes ou insucessos que requerem uma reparação com alguma envergadura.

Com base em informação recolhida pela ICOLD (1974, 1995), Foster *et al.* (1998, 2000a, 2000b) *apud* Fell *et al.* (2014) fazem um estudo estatístico acerca de acidentes ocorridos em barragens de aterro construídas até 1986. Concluiu-se neste estudo que:

- 1 em cada 25 grandes barragens de aterro construídas antes de 1950 e 1 em cada 200 construídas depois de 1950 resultaram em insucesso.
- Apenas 1 em cada 5000 resultaram em insucesso devido a problemas de estabilidade.
- 1 em cada 200 tiveram acidentes resultantes de problemas de estabilidade.
- 1 em cada 300 resultaram em insucesso devido a fenómenos de erosão remontante através do corpo da barragem.
- As barragens homogéneas de terra, barragens de terra com dreno no pé de jusante e todas as barragens com poucos ou nenhuns filtros são as que apresentam um maior número de insucessos.
- 1 em cada 40 tiveram acidentes que resultaram de fenómenos de erosão remontante através do corpo da barragem. Este tipo de acidentes acontece, mais frequentemente, em barragens de enrocamento com núcleo de terra, barragens de terra com núcleo argiloso, barragens de enrocamento com paredes do núcleo em betão e em aterros hidráulicos.

- As barragens homogêneas têm mais tendência em resultar em falhas, do que em terem acidentes. Isto acontece pois este tipo de barragens não apresenta núcleo, filtros ou qualquer outro tipo de material que controle a erosão ou a erosão regressiva.
- Por outro lado, as barragens de enrocamento e as barragens com núcleo “impermeável” têm vários acidentes, mas apenas uma resultou em falha, o que prova que a existência de zonas de transição, filtros e a capacidade de descarga elevada do enrocamento no maciço de jusante pode possibilitar a existência de erosão interna e a sua progressão para formar uma fuga, mas a falha deste tipo de barragens é improvável.
- 1 em cada 600 barragens resultaram em falha e 1 em cada 300 tiveram acidentes relacionados com fenómenos de erosão regressiva na fundação.

As Tabelas 1.1 e 1.2, adaptadas de Fell et al. (2014) resumem o estudo estatístico referente às falhas e acidentes ocorridos em barragens de aterro a nível internacional.

Tabela 1.1 - Estatística global das falhas ocorridas em barragens de aterro a nível internacional - com exceção das construídas na China e todas as anteriores a 1930 no Japão (adaptado de Foster *et al.*, 1998, 2000a *apud* Fell *et al.* 2014)

| Tipos de Falhas | Número de ocorrências | | % de falhas | | Probabilidade média de ocorrência (10^{-3}) | |
|---|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|---|--------------------|
| | Falhas totais | Falhas na operação | Falhas totais | Falhas na operação | Falhas totais | Falhas na operação |
| Dimensionamento errado do descarregador de cheias | 46 | 40 | 36 | 34 | 4 | 3.5 |
| Deficiência nas comportas do descarregador | 16 | 15 | 12 | 13 | 1.5 | 1.5 |
| Subtotais de galgamento e falhas anexas | 62 | 55 | 48 | 47 | 5.5 | 5 |
| Erosão interna através do corpo da barragem | 39 | 38 | 30 | 33 | 3.5 | 3.5 |
| Erosão interna através da fundação | 19 | 18 | 15 | 15 | 1.5 | 1.5 |
| Erosão interna do corpo até à fundação | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.2 | 0.2 |
| Subtotais erosão interna | 59 | 57 | 46.5 | 48.5 | 5 | 5 |
| Deslizamentos a jusante | 6 | 4 | 5 | 3.5 | 0.5 | 0.4 |
| Deslizamentos a montante | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.1 | 0.1 |
| Subtotais deslizamentos | 7 | 5 | 6 | 4.5 | 0.6 | 0.5 |
| Sismos/liquefação | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.2 | 0.2 |
| Fatores desconhecidos | 8 | 7 | - | - | - | - |
| Número total de falhas | 136 | 124 | | | 12 | 11 |
| Número total de falhas conhecidas | 128 | 117 | | | | |
| Número total de barragens de aterro | 11192 | 11192 | | | | |

No caso específico de Portugal apenas é importante referir o caso da barragem do Lapão que foi construída em 2001. Após dois anos da sua construção, a barragem apresentou deficiências ao nível da sua deformabilidade, comportamento hidráulico e resistência mecânica. Por questões de segurança foi necessário proceder ao esvaziamento rápido desta, tendo sido proposto pelo LNEC uma reavaliação da mesma e a conceção de um projeto de reabilitação. Até aos dias de hoje apenas se garantiu que a barragem permita o livre escoamento das águas que afluem à sua albufeira não tendo sido feito mais nada devido à falta de orçamento para a reabilitação proposta. Esta é, em Portugal, a única barragem que se encontra desativada devido a problemas resultantes de fenómenos de erosão remontante e problemas estruturais.

Tabela 1.2 – Estatística global dos incidentes devidos a fenómenos de erosão interna e respetiva fase de vida da barragem em que ocorreram (adaptado de Foster et al., 1998, 2000a *apud* Fell et al., 2014)

| Tipos de Incidentes | Altura do Incidente | Número de casos | | % de casos (conhecidos) | |
|---|---|-----------------|------------|-------------------------|------------|
| | | Falhas | Acidentes | Falhas | Acidentes |
| Erosão interna através do corpo da barragem | Durante a construção | 1 | 0 | 2 | 0 |
| | Durante o 1º enchimento | 24 | 26 | 48 | 26 |
| | Durante 1ª etapa de exploração (primeiros 5 anos) | 7 | 13 | 14 | 13 |
| | Passada a 1ª etapa de exploração | 18 | 60 | 36 | 61 |
| | Desconhecida | 1 | 3 | - | - |
| | Número total de incidentes | 51 | 102 | 100 | 100 |
| Erosão interna através da fundação | Durante a construção | 1 | 0 | 5 | 0 |
| | Durante o 1º enchimento | 4 | 23 | 20 | 30 |
| | Durante 1ª etapa de exploração (primeiros 5 anos) | 10 | 19 | 50 | 24 |
| | Passada a 1ª etapa de exploração | 5 | 36 | 25 | 46 |
| | Desconhecida | 1 | 7 | - | - |
| | Número total de incidentes | 21 | 85 | 100 | 100 |
| Erosão interna do corpo até à fundação | Durante a construção | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Durante o 1º Enchimento | 2 | 6 | 50 | 20 |
| | Durante 1ª etapa de exploração (primeiros 5 anos) | 2 | 8 | 50 | 27 |
| | Passada a 1ª etapa de exploração | 0 | 16 | 0 | 53 |
| | Desconhecida | 0 | 1 | - | - |
| | Número total de incidentes | 4 | 31 | 100 | 100 |

1.2 Justificação e objetivos da dissertação

As barragens, nomeadamente as de aterro, podem apresentar diversos problemas a nível do seu desempenho. Por isso é importante conseguir prever eventuais comportamentos que podem acontecer na barragem que se vai construir ou que já foi construída. Deste modo, a observação das barragens permite, para além do controlo direto da segurança, validar se o comportamento real verificado durante a fase de exploração se aproxima do previsto ou, em que medida, se afasta dele.

Nesse sentido, pretende-se estudar e organizar os dados de monitorização já existentes para, eventualmente com o auxílio de programas de inteligência artificial ou outros, se poder avaliar ou até antecipar o comportamento das barragens de aterro. O principal objetivo é a utilização e organização da informação já existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, relativa à observação de barragens de aterro. Esta será utilizada no estudo e interpretação do comportamento destas barragens, com base em duas grandezas principais: as pressões de água, os deslocamentos superficiais e os caudais percolados. Para o efeito criou-se uma base de dados em Access®, com base nos dados históricos de comportamento de barragens de aterro construídas em Portugal, disponibilizados pelo LNEC. Pretendeu-se, assim, tornar estes dados mais simples de consultar, de forma a conseguir-se uma verdadeira base de dados estruturada, permitindo ainda corrigir, completar ou introduzir novos dados.

Estudou-se, igualmente, a possibilidade da criação de um algoritmo ou da utilização de um já existente que, com base naqueles dados históricos de comportamento de barragens de aterro construídas em Portugal, possibilitasse obter uma previsão do comportamento esperado para um dado tipo de barragem, no que respeita à evolução dos valores de pressão de água ou dos deslocamentos superficiais esperados nas próximas medições a efetuar. Desta forma, será possível antecipar quer a existência de situações anómalas no comportamento previsto, quer antecipar a resposta respetiva para remediar ou tratar o problema detetado de uma forma mais célere, evitando a ampliação do problema relacionado com as duas variáveis em estudo - pressões de água e deslocamentos superficiais.

1.3 Estrutura

A presente dissertação divide-se em 5 capítulos.

O primeiro capítulo pretende introduzir e justificar o tema.

No segundo abordam-se aspetos referentes à observação do comportamento de barragens de aterro, nomeadamente os diversos tipos destas barragens e como funciona a respetiva observação dos variados aspetos que têm de ser controlados em cada um dos órgãos que as compõem. Por último são apresentados os vários modelos de previsão do comportamento que atualmente se utilizam em várias áreas científicas, com especial ênfase na sua utilização para o estudo do comportamento de barragens de aterro.

O terceiro capítulo aborda a metodologia de trabalho adotada enquadrando numa primeira parte todo o processo desde a seleção da melhor rede neuronal artificial – RNA, a utilizar para o estudo, as várias tentativas de criação de um algoritmo de RNA, até à adoção de uma interface de utilizador com algoritmos pré-definidos de RNA. Numa segunda parte são apresentadas as RNA, de uma maneira geral, e em particular, é apresentado o algoritmo escolhido para o estudo: *Multi Layer Perceptron Backpropagation*. Numa última secção é explicado todo o processo de uniformização e criação da base dados das barragens de aterro do Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC.

O quarto capítulo dedica-se ao caso de estudo, enquadrando a barragem selecionada para o efeito, apresentando os resultados obtidos pelo *Neuroph Studio* das RNA criadas para o estudo do comportamento dos valores de pressões de água e deslocamentos superficiais.

No quinto e último capítulo são analisados e criticados os resultados obtidos e discutem-se possíveis trabalhos futuros.

Complementam ainda este documento quatro anexos.

2 Observação do comportamento de barragens de aterro

O presente capítulo apresenta uma descrição da classificação de barragens de aterro considerada nesta dissertação após pesquisa da literatura temática. De seguida, aborda a observação do comportamento destas estruturas, com especial ênfase na respetiva monitorização e inspeção visual, atendendo àquilo que de mais recente se estudou relativamente a estes processos, e desenvolvendo esta temática dentro daquilo que serão as grandezas utilizadas neste estudo. Por último, apresentam-se os modelos de previsão do comportamento, dando relevo à respetiva utilização no âmbito das barragens de aterro.

2.1 Tipo de barragens de aterro

As barragens de aterro têm uma significativa diversidade de tipos e, muitas vezes, existem barragens que são projetadas especificamente para a zona onde vão ser construídas, pois as propriedades do terreno exigem características específicas para controlar certo tipo de potenciais problemas. Como se pode observar na Figura 2.1, existem diferentes abordagens na classificação do tipo de barragens, mas que, no fundo, se complementam:

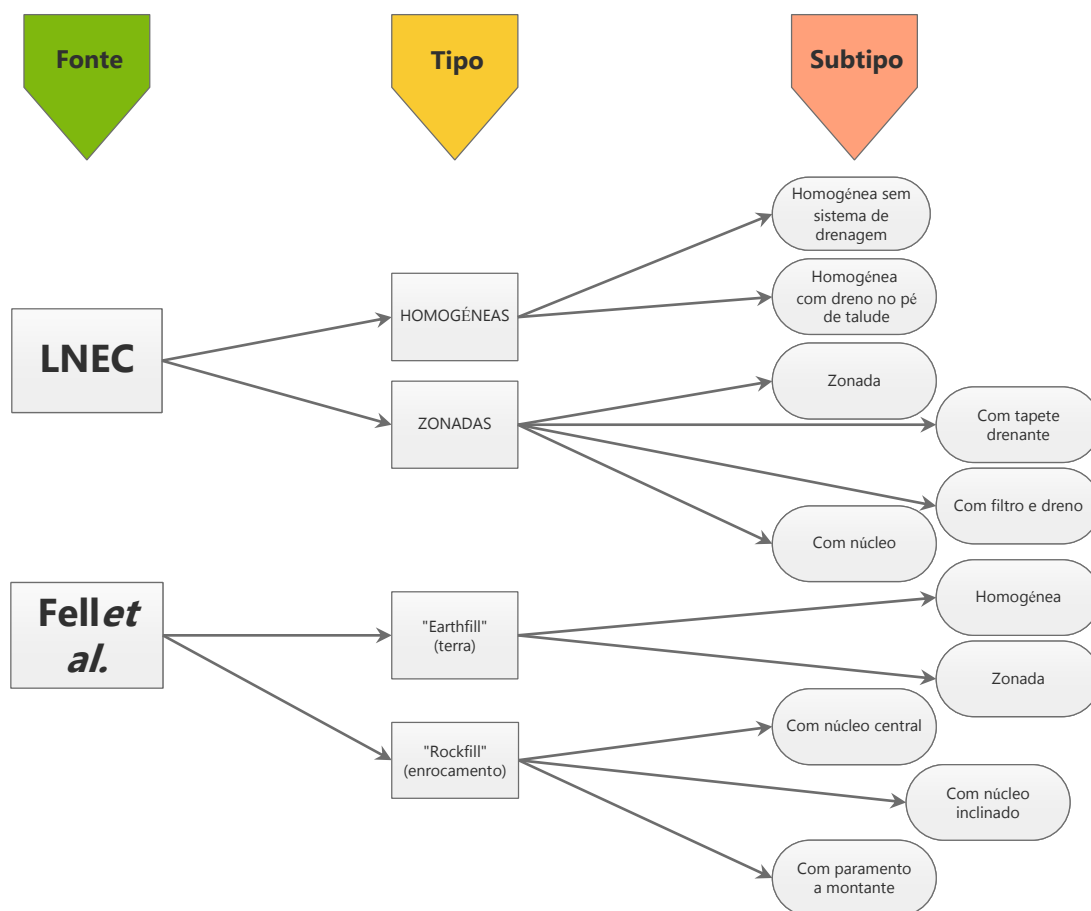




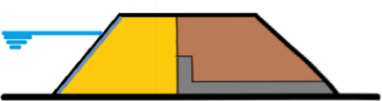



Figura 2.1 – Diagrama de dois tipos genéricos de classificação de barragens de aterro (adaptado de Agência Nacional de Águas, 2013 e Fell et al., 2014)

Nesta dissertação serão apenas abordados os dois principais tipos de barragens: as homogêneas e as zonadas. Com base na classificação exemplo genérica descrita no documento da Agência Nacional de Águas – ANA (Agência Nacional de Águas, 2013), existem seis tipos principais de barragens de aterro caracterizadas na Tabela 2.1:



Tabela 2.1 – Tipos de barragens de aterro de acordo com a classificação exemplo genérica descrita no documento da Agência Nacional de Águas (Agência Nacional de Águas, 2013)

| Tipo de barragem | Características | Ilustração tipo do perfil |
|---|--|---|
| Barragem Homogénea | Essencialmente constituída por materiais finos, sendo a percolação e a erosão difíceis de controlar. Este tipo de barragens não deve atingir mais do que 5 m de altura. |  |
| Barragem homogénea com dreno no pé de talude | Constituída essencialmente por materiais finos, este tipo de barragens já consegue fazer um pequeno controlo da percolação, com o auxílio do dreno de pé de talude. Mas o seu funcionamento adequado vai depender da isotropia do material. Este tipo de barragens não deve atingir mais do que 10 m de altura. |  |
| Barragem zonada | Com materiais diferentes ou com compactações diferentes, o controlo da percolação é feito pelo material que é colocado a jusante. Este tipo de barragens não deve atingir mais do que 20 m de altura. |  |
| Barragem com tapete drenante | Constituída essencialmente por material fino, assemelha-se bastante às barragens homogéneas, sendo a única diferença o tapete drenante que é construído a jusante com o objetivo de controlar a percolação e a erosão. Tal como já foi referido para as barragens com dreno no pé de talude, este tapete drenante vai ter um funcionamento dependente da isotropia da permeabilidade do material. Este tipo de barragem não deve atingir mais do que 10 m de altura. |  |
| Barragem com filtro e dreno | Pode ser homogénea ou zonada. Este filtro e dreno conseguem, efetivamente, controlar o escoamento e a erosão. Este tipo de barragens não apresenta qualquer limitação quanto à altura máxima que pode atingir. |  |
| Barragem zonada com núcleo | Estas são consideradas as barragens mais completas, onde há um cuidado especial na seleção dos materiais. Utilizam-se um filtro e um dreno que possibilitam um efetivo controlo da percolação e erosão. Usam-se os materiais mais finos e impermeáveis para o núcleo e os mais grosseiros e resistentes para os maciços. Este tipo de barragens não apresenta qualquer limitação quanto à altura máxima que pode atingir. |  |

São ainda de referir duas variações no perfil tipo de barragens de aterro que têm em particular a inserção de um ou vários elementos de material artificial. Este tipo de barragens – Tabela 2.2, podem fazer parte integrante de apenas uma barragem, podendo ser inseridos em todas as barragens referidas na Tabela 2.1.

Como se verificou o fator principal, e que provoca mais variações estruturais nestas barragens, é o facto de serem constituídas ou por materiais homogéneos ou distintos e distribuídos por diferentes zonas. As outras variações derivam da necessidade de controlar a percolação e a erosão e podem ser utilizadas em ambos os tipos de barragens – homogéneas e zonadas.

Tabela 2.2 – Barragens de aterro com elementos artificiais na sua constituição (adaptado de Silva, 2014)

| Tipo de barragem | Características | Ilustração tipo do perfil |
|---|---|---|
| Barragem com núcleo artificial | Este tipo de barragens apresenta um núcleo constituído por material artificial – normalmente betão plástico, em vez de materiais finos e impermeáveis. Podem ser zonadas ou homogéneas e, tal como na barragem zonada com núcleo, podem ter instalados filtros e drenos. Dependendo das componentes constituintes da barragem o seu limite de altura irá variar, mas caso sejam cumpridos os requisitos da barragem com núcleo, este tipo de barragens não irá apresentar qualquer limitação quanto à altura máxima que pode atingir. |  |
| Barragem com paramento de montante impermeável | Podendo ser zonada ou homogénea, este tipo de barragem apresenta no paramento de montante um enrocamento compactado protegido por um material artificial impermeável. O material impermeável pode ser betão armado, betão betuminoso ou chapa de aço. Para que a estrutura artificial esteja estável é necessário suportá-la com um auxílio de um plinto, que é fundado em rocha pouco alterada na fundação da barragem e nos encontros. A sua altura irá depender de fatores como o zonamento da barragem e os sistemas de drenagem instalados na mesma. |  |

2.2 Observação do comportamento

As estruturas como as barragens de aterro (terra e enrocamento) precisam de ser observadas para, em primeiro lugar, verificar os pressupostos de projeto e, adicionalmente, caso o projeto seja viável, garantir a sua segurança durante e após a sua construção. A observação do comportamento de barragens deve ser feita através da instrumentação, por amostragem, e complementada pela inspeção visual da barragem. A inspeção visual, a desenvolver por pessoal qualificado e já com alguma experiência neste tipo de trabalho, é indispensável para a deteção de problemas que os sistemas de instrumentação não conseguem monitorizar e que, muitas vezes, caso não sejam identificados e tratados, podem acarretar consequências graves para a estrutura. Alguns exemplos desses problemas são: assentamentos pontuais, fissuras ou infiltrações com caudal elevado. Para uma observação adequada é necessário medir várias grandezas que são efeitos resultantes da construção da barragem, tais como:

- Deslocamentos:
 - Superficiais;
 - Internos;
- Pressões (água);
- Tensões e forças;
- Caudais;
- Níveis hidráulicos.

Dentro destes, os mais importantes para o estudo do comportamento das barragens de aterro, são os deslocamentos superficiais, as pressões de água, os níveis de água da albufeira – NAA, e os caudais. Estas quatro grandezas estão na origem dos problemas que, indireta ou diretamente, levam ao aparecimento de outros e, por isso, a melhor maneira de os controlar é tratá-los a partir da sua origem.

Para a instrumentação de uma barragem é necessário trabalhar no sentido de satisfazer todos os requisitos específicos da obra, tanto em termos do controlo do comportamento como da avaliação da segurança. Para uma instrumentação de qualidade é necessário e essencial que os equipamentos de

medição sejam escolhidos tendo em atenção as técnicas de construção, as possibilidades técnicas da instalação dos equipamentos e aos diferentes parâmetros que irão ser avaliados. Consoante a necessidade de precisão da medição, o equipamento utilizado vai variar e, muitas vezes, não é necessário investir num equipamento mais preciso, quando as medições pretendidas se conseguem obter com equipamentos mais baratos e de instalação mais fácil. Para resultados significativos e fiáveis é preciso ter o devido cuidado na instalação de todos os equipamentos de monitorização. Segundo Pujol et al. (*in press*) na seleção dos equipamentos devem-se ter em conta os seguintes aspetos:

- simples na sua conceção e uso;
- robustos;
- resistentes às adversidades exteriores (temperatura, humidade, sobrecargas de corrente);
- duradouros (especialmente para equipamentos integrados no corpo da barragem durante a sua construção);
- precisos, fiáveis e de leitura fácil.

Caso os equipamentos de instrumentação não sejam parte integrante da barragem, isto é, não tenham sido instalados no corpo da barragem, é importante que estes sejam de fácil acesso e que seja possível a sua substituição com o intuito de dar continuidade às medições. É ainda aconselhável que o equipamento seja suficientemente redundante prevenindo, assim, falhas ou problemas de funcionamento. Devem sempre ser utilizados dois sistemas diferentes para avaliar uma mesma grandeza de maneira a que, se um falhar, possa sempre existir um outro de *backup* (adaptado de Pujol et al., *in press*).

Adicionalmente, esta instrumentação, deve permitir a utilização de modelos de previsão do comportamento, para que se possa fazer uma comparação entre os valores medidos e os valores esperados. A seleção das grandezas a utilizar nesta instrumentação e a quantidade e variedade de equipamentos devem ter em conta vários requisitos (*op. cit.*):

- condições do projeto;
- cenários de risco associados;
- historial de ocorrências durante a fase de construção.

Um dos fatores mais importantes para a avaliação e controlo da segurança numa barragem de aterro é a correta monitorização e instrumentação da percolação através do corpo da barragem e da sua fundação. Por essa razão é essencial que a monitorização dos níveis piezométricos, nível de água de albufeira e caudais seja efetuada em determinados pontos críticos e que haja uma comparação entre estas várias grandezas de forma a controlar e perceber o comportamento da percolação na barragem.

Para além disso, é essencial o controlo das deformações do aterro, de forma a detetar comportamentos estruturais anormais do corpo da barragem. Por essa razão é de extrema importância o controlo dos deslocamentos superficiais.

Os deslocamentos superficiais são normalmente monitorizados com o auxílio de marcas superficiais, varrimento laser – ainda em desenvolvimento e com uma precisão inferior à dos restantes métodos; muitas vezes também se utilizam linhas de referência (candeeiros, lancil do passeio, etc.) no método de triangulação. A observação no local da construção - inspeção visual, deve ser feita ao pormenor, para que todo e qualquer movimento possa ser registado e observado. A observação à distância e de variadas perspetivas é bastante importante para detetar movimentos que, de perto ou de certas perspetivas, não se identificam (adaptado de Marcelino, 2006).

Quanto às pressões de água, estas devem ser registadas com a ajuda de piezómetros, que fornecem os valores das pressões de água na barragem e na sua envolvente – a montante, a jusante, na fundação e no corpo da barragem. Existem três tipos de instrumentos para o registo das pressões de água: piezómetros hidráulicos, piezómetros elétricos e piezómetros pneumáticos (adaptado de Marcelino, 2006).

O controlo do NAA é importante na medida em que serve de indicador para o comportamento geral do corpo e fundação da barragem. Variações negativas num curto espaço de tempo – três, quatro dias a uma semana, sem que nada tenha sido feito para que estas se dessem, pode ser indicador de que

algo está errado ao nível da percolação da água pela estrutura, o seu corpo e a sua fundação. Este tipo de anomalias levam a que os responsáveis pela obra tenham de fazer uma verificação dos vários fatores que podem estar na respetiva origem. Para isso são feitas verificações em todos os registos dos equipamentos de instrumentação instalados inicialmente na barragem e em toda a sua envolvente. O NAA é normalmente medido através de: escalas limnimétricas – medições realizadas manualmente e por um operador no local; limnigrafos (registo contínuo) – registo através de flutuadores, sistemas pneumáticos ou transdutores de pressão (adaptado de Marcelino, 2006).

Para a medição e controlo dos caudais, sendo estes parte integrante do funcionamento hidráulico da obra, devem considerar-se os seguintes aspetos: qual o caudal previsto no projeto; quais os pontos ou ponto de leitura – no caso de serem vários, ter em atenção que o caudal total é o somatório de todos os caudais registados em cada ponto para um determinado momento de medições. Em certas situações e de maneira a facilitar o trabalho do operador ou de diminuir os gastos nos instrumentos de medição, é construída uma estrutura, em canal, para onde são encaminhadas todas as águas dos vários pontos de leitura. Com um descarregador triangular, a leitura é direta e por essa razão torna-se mais fácil automatizar este tipo de medições (adaptado de Marcelino, 2006).

Num documento da ICOLD (Pujol et al., *in press*), são apresentados duas tabelas-resumo – Tabela 2.3 e Tabela 2.4, das alterações mais importantes que podem ser observadas nas diferentes componentes das barragens, nas respetivas estruturas anexas e na sua envolvente aquando da inspeção visual.

Tabela 2.3 – Inspeção visual: alterações a inspecionar em cada órgão constituinte de uma barragem de aterro (adaptado de Pujol et al., *in press*)

| Local da barragem | Alterações |
|--|--|
| A jusante | Infiltrações de água à superfície Zonas alagadas Turbidez Fissuras, assentamentos locais e deslizamentos locais Erosão – desenvolvimento de ravinas Vegetação Tocas de animais |
| Coroamento | Fissuras, assentamentos locais Erosão Vegetação Tocas de animais Condição da rodovia Linha de visão – verificação dos alinhamentos horizontais e verticais |
| A montante | Formação de vórtices na superfície da água Fissuras, deformações locais, deslizamentos locais Abaulamento de elementos da vedação Danos na impermeabilização do paramento Deslocamentos no <i>rip-rap</i> Vegetação Tocas de animais |
| Galeria de inspeção | Fissuras Infiltrações, turbidez Zonas com precipitação de material rochoso Estado do betão que possa existir Entupimentos no sistema de drenagem |
| Fundações e zonas de contato entre aterro e betão | Deslocamentos relativos Assentamentos locais Infiltrações/fugas de água |

Tabela 2.4 – Inspeção visual: alterações na envoltória e nos órgãos anexos de uma barragem (adaptado de Pujol et al., in press)

| Órgãos anexos | Zona | Alterações |
|------------------------------------|---|---|
| Paramentos (se acessível) | <i>Superfície</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Fissuras • Deslocamentos |
| Subsolo e Muros | <i>Zonas de contato</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Infiltrações à superfície, fervilhações superficiais, turbidez • Zonas alagadas • Fissuras, assentamentos locais, deslizamentos locais • Erosão • Vegetação |
| | <i>Galerias, poços e acessos</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Infiltrações, turbidez • Zonas com precipitação de material rochoso • Estado do betão, rocha e contato • Entupimento dos sistemas de drenagem |
| Envoltória | <i>Albufeira (superfície)</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Detritos flutuantes • Poluição |
| | <i>Albufeiras (bancos e encostas)</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Assentamentos e deslizamentos • Fissuras (indicadoras de possíveis problemas de deslizamento) • Estado das infraestruturas • Vegetação • <i>Sink holes</i> (Sumidouros) |
| | <i>A jusante</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Fervilhações superficiais • Zonas alagadas • Vegetação |
| Estruturas Hidráulicas | <i>Descarregador de cheias</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Fissuras • Erosão • <i>Scour holes</i> (cratera de erosão) a jusante • Deslocamentos ou movimentos nas juntas • Detritos Flutuantes |
| | <i>Tomada de água</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Estado • Valores de pressão na estrutura • Fugas ao longo da conduta, turbidez • Deslocamentos • Detritos Flutuantes |
| | <i>Descarregador de fundo</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Erosão • Movimentos nas juntas, Fissuras • <i>Scour holes</i> (cratera de erosão) a jusante |
| Instalações eletromecânicas | <i>Geradores</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade no ponto de uso |
| | <i>Comportas e sistemas de elevação</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Danos • Fugas de óleo • Corrosão • Vandalismo (medidas de proteção) |

Hoje em dia procura-se automatizar todos os equipamentos de medição para que não seja necessário o deslocamento diário ou semanal à barragem para se registarem as medições.

Mas, para uma avaliação mais profunda e completa, é necessário, em qualquer situação, registar fotograficamente toda a barragem e todas as anomalias encontradas. Os problemas devem ser identificados e catalogados em conjunto com as fotografias que lhes dizem respeito. Estas fotografias devem ilustrar, de uma maneira clara, qual o problema em questão e a respetiva resposta da barragem.

Existem vários fatores que irão fazer com que o problema a tratar tenha características diferentes. O material que as compõe – propriedades físicas da barragem; e o facto de ser homogénea ou zonada são alguns dos principais fatores que fazem variar estas características. Este último, apenas relacionado com a própria barragem, é o mais importante. Com igual relevância, também deve ser alvo

de estudo a sua envolvente: a geologia envolvente e a do local onde está fundada a barragem, as condições meteorológicas e a geomorfologia.

Ainda no mesmo documento (*op. cit.*) a ICOLD apresenta um quadro resumo dos parâmetros significativos na monitorização do comportamento de barragens e respetivas fundações, de que se apresentam, apenas aquelas que se referem às barragens de aterro, Tabela 1.5.

Tabela 2.5 – Monitorização do comportamento em barragens de aterro: parâmetros significativos a controlar (adaptado de Pujol et al., in press)

| Corpo | Fundações |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Deformação do corpo da barragem • Deslocamentos especiais (relacionados com estruturas de betão) • Temperatura do corpo da barragem para deteção de infiltrações (raro) • Pressões intersticiais no aterro e níveis piezométricos • Infiltrações e caudais • Análise química das infiltrações • Turbidez | <ul style="list-style-type: none"> • Deformações • Deslocamentos dos pilares das fundações ou muros • Deslocamentos especiais (fissuras e diáclases) • Temperatura do corpo da barragem para deteção de infiltrações (raro) • Pressões intersticiais • Forças de <i>uplift</i> (subpressão) • Níveis piezométricos • Nível Freático • Infiltrações, caudais e ressurgências • Análise química das infiltrações • Turbidez |

2.3 Modelos de previsão do comportamento

As barragens são estruturas com um tempo de vida significativo, pelo que, é necessário garantir que a sua conceção seja feita da maneira mais rigorosa e com os materiais que, dependendo do local onde é construída, mais se adequem à resposta esperada e ao respetivo tipo de utilização.

O controlo do comportamento durante todo o tempo de vida da barragem é, por isso, importante. A história prova que, quando uma barragem falha, as consequências são, às vezes, demasiado penosas para o ser humano, as perdas de milhares de vidas e os danos causados nas populações vizinhas custam até 10 vezes mais do que o valor investido na construção da barragem (adaptado de Carrère et al., 2013).

Os modelos de previsão do comportamento são ferramentas que surgem com a necessidade de prever problemas antes destes acontecerem. Assim, não só se conseguem evitar muitos como também que certos problemas atinjam uma gravidade demasiado elevada.

Existem vários tipos de modelos, são eles (Marcelino, 2014):

- modelos conceituais;
- modelos empíricos;
- modelos matemáticos.

2.3.1 Modelos conceituais

Os modelos conceituais “*consistem, essencialmente, no estabelecimento da resposta esperada para a barragem, com base na consideração conjunta dos aspetos relativos à sua conceção e os do comportamento exibido por obras semelhantes*” (*op. cit.*). Este tipo de modelos é muitas vezes utilizado como complemento para avaliar qual o comportamento esperado para a barragem em estudo, não se definindo valores específicos de medições, os modelos apenas são utilizados na avaliação das respostas da observação da barragem em estudo. Estes modelos dependem de quem os constrói, sendo a experiência um fator bastante importante para a obtenção de um modelo conceitual adequado.

2.3.2 Modelos empíricos

O modelo empírico consiste na observação e interpretação de alguns dados experimentais com o intuito de criar um mecanismo que se adeque e que, convenientemente, possa ser aplicado a outros dados relacionados com os experimentais. Desta forma, com o auxílio de alguma experiência e um conjunto de equações adequadas, este modelo é normalmente utilizado com outros modelos matemáticos com o objetivo de obter respostas desejadas no estudo do comportamento de um determinado tipo de barragens.

2.3.3 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos para a previsão do comportamento funcionam com os valores medidos e os valores esperados ou valores de referência. O resultado do modelo resulta diretamente das condições iniciais inseridas e pretende simplificar a realidade. É essencial que a monitorização dos valores seja feita com rapidez e que eles sejam inseridos no modelo com a maior brevidade possível. Só desta maneira o modelo consegue detetar alguma anomalia que possa estar a acontecer e, só assim, se conseguem implementar as medidas de resolução/remediação do problema em tempo útil. Os modelos matemáticos têm ainda em conta a influência das variações ocorridas na barragem e sua envolvência. É por esta razão que, em qualquer modelo matemático, se procura encontrar a ligação causa-efeito, isto é, conseguir relacionar as variáveis causadoras do problema com as variáveis da resposta estrutural da barragem ao problema. Só identificando estes dois fatores e relacionando-os é que se consegue, muitas vezes com base no conhecimento anterior, prever possíveis comportamentos. Dentro dos modelos matemáticos existem vários tipos, a seguir descritos:

- Modelos determinísticos;
- Modelos estatísticos (semi-empíricos);
- Modelos híbridos;
- Modelos de redes neuronais artificiais – RNA.

Os modelos de RNA serão abordados no Capítulo 3, referente à metodologia, por serem a ferramenta utilizada na presente dissertação.

2.3.3.1 Modelos determinísticos

Esta modelação obtém os resultados com a ajuda de modelos matemáticos já conhecidos e cientificamente aceites. A qualidade da previsão obtida depende:

- da capacidade do modelo matemático na descrição da realidade física;
- da qualidade da solução numérica;
- do conhecimento dos parâmetros que definem o material;
- das simplificações introduzidas no modelo;
- e do conhecimento das variáveis independentes aquando da observação.

Aquilo que caracteriza essencialmente estes modelos é que eles não precisam de medições anteriores para saberem como tratar a informação, mas sempre que elas existam devem ser inseridas de forma a permitir a calibração do modelo antes deste ser utilizado. Para executar este tipo de modelos é necessário obter alguns dados da barragem, tais como o NAA e as características geológicas e geotécnicas do material que compõe o corpo e a fundação da barragem de forma a ter valores que possam ser utilizados na modelação. Normalmente, os modelos utilizam as informações provenientes dos parâmetros que caracterizam o material para efetuar os cálculos. No entanto, este modelo é o único que pode ser utilizado com maior fiabilidade durante os primeiros anos após a conceção da barragem. O objetivo principal do modelo é padronizar as características da barragem com base na comparação dos valores previstos com os valores observados ao longo de um determinado intervalo de tempo (adaptado de Carrère *et al.*, 2013).

2.3.3.2 Modelos estatísticos (semi-empíricos)

Os modelos estatísticos assumindo uma forma analítica, *a priori*, calculam os valores com base na experiência. Um conjunto de funções de influência é escolhida de acordo com a variação esperada dos valores medidos. Cada componente das funções é multiplicada por um coeficiente desconhecido. Estes coeficientes são definidos com a ajuda de resultados obtidos anteriormente. Normalmente, estes são calibrados de forma a minimizar o valor de uma norma/fator, que permite perceber se os coeficientes estão ou não adequados às funções e ao modelo – a norma mais utilizada é o erro quadrático médio - EQM. Esta técnica é bastante flexível e permite a adaptação a todo o tipo de valores mensuráveis. Existe assim uma grande flexibilidade do modelo na adaptação a todo o tipo de valores inseridos; esta adaptação é tanto maior quanto maior forem os graus de liberdade da forma analítica escolhida inicialmente. Por outro lado, quanto mais graus de liberdade, maior terá de ser o número de valores medidos e as funções de influência, para que se consigam obter coeficientes representativos e consistentes com aquilo que o modelo pretende prever. Para utilizar este tipo de modelos é necessário ter disponíveis dados de experiências anteriores que sejam o suficientemente homogêneos e completos. É indispensável a análise estatística das correlações para verificar a adequação da modelação aos dados em estudo (adaptado de Carrère *et al.*, 2013).

2.3.3.3 Modelos híbridos

Esta modelação é a combinação dos dois modelos descritos anteriormente (Schmitter, 1969; Sharma *et al.*, 1994). O modelo, assumindo uma forma analítica obtida por processos determinísticos, mas com coeficientes obtidos por processos estatísticos, faz o cálculo dos valores. Existem outros autores que propõem outros modelos híbridos. Fanelli & Giuseppetti (1986) sugerem uma avaliação individual dos parâmetros constituintes da forma analítica, onde a componente hidrostática é modelada com base em processos determinísticos e a componente térmica com base em processo estatísticos. Carrère *et al.* (2000) sugerem que a forma analítica seja modelada por processos estatísticos. Quanto à calibração dos coeficientes é sugerido que, numa fase inicial, seja feito através de um conjunto de análises estruturais do modelo do projeto com condições variadas; numa fase posterior este conjunto de análises vai sendo substituído, gradualmente, por valores mais atualizados, baseados em novas medições. A principal vantagem deste modelo proposto por Carrère *et al.* (*op. cit.*) é a sua capacidade de adaptação ao comportamento da barragem ao longo da sua vida (*op. cit.*).

Estes modelos são usados essencialmente quando existem dados incompletos de experiências anteriores. Por exemplo, quando existe uma determinada característica do material da barragem que não foi medida ou quando a quantidade de medições efetuadas não é suficientemente representativa e homogênea para ser utilizada num modelo estatístico.

2.3.4 Limitações

Os modelos de previsão do comportamento representam uma simplificação do sistema real, para que seja possível prever comportamentos futuros. Por essa razão acabam por surgir desvios da realidade que limitam a qualidade dos resultados obtidos pelos modelos. A ICOLD define os principais desvios da realidade quando se aplicam modelos matemáticos de previsão (adaptado Carrère *et al.*, 2013):

- simplificações da geometria (restrição dos limites geométricos do modelo, simplificação geométrica de algumas estruturas);
- simplificação nas propriedades do material, no que diz respeito às suas propriedades intrínsecas, através de leis que apenas se aproximam da realidade;
- simplificação espacial das variações de comportamento do material;
- simplificação esquemática da distribuição das cargas no espaço e no tempo.

Estas simplificações podem ser consideradas, com certas adaptações, para todos os modelos de previsão abordados anteriormente. Os resultados obtidos pelo modelo irão depender das simplificações

adotadas para a sua criação. Quanto maior o número de simplificações maior será o erro relativamente à realidade. Para validação destes modelos é essencial a utilização de outros que, de uma forma diferente, consigam fazer as mesmas previsões. É também importante a experiência daqueles que utilizam os modelos e percebem qual o comportamento da modelação que estão a efetuar.

3 Metodologia

Apresenta-se neste capítulo o processo adotado para a execução desta dissertação. Numa primeira parte, é feito o enquadramento do processo de pesquisa e seleção da rede neuronal artificial – RNA, a utilizar, descrevendo-se as dificuldades encontradas durante este processo. Numa segunda parte, introduz-se o conceito de RNA e o tipo de rede selecionada, detalhando o seu funcionamento. Na última secção é descrito todo o processo da criação da base de dados das barragens de aterro estudadas ou monitorizadas pelo LNEC.

Com o objetivo de selecionar o melhor tipo de RNA a utilizar no estudo dos parâmetros que mais influenciam o comportamento de uma barragem de aterro, foi necessário pesquisar alguns artigos, livros e dissertações, nomeadamente: Mata (2008), Teófilo, Silva, & Costa (2008) Masse et al. (2008), Russel & Norvig (2010), Witten & Frank (2011), Cruz (2013; 2014), que também recorreram, ou que simplesmente explicam e apresentam exemplos de como utilizar essas ferramentas. Ao longo de todo este processo optou-se por utilizar o algoritmo de RNA *Multi Layer Perceptron BackPropagation*, e justifica-se na secção 3.2 o motivo dessa escolha.

Constituindo o programa que faz a previsão apenas uma ferramenta para o estudo, é necessário que os dados utilizados pelo programa sejam tratados, de maneira a que estes possam ser trabalhados de forma correta e, conseqüentemente, possam ser obtidos resultados fiáveis e consistentes. Por essa razão é relevante a preparação dos dados. Com o intuito de organizar os dados e facilitar a utilização dum programa de inteligência artificial na leitura e na execução do algoritmo, implementou-se uma base de dados no programa Access® com os valores existentes de dados históricos de comportamento de barragens de aterro construídas em Portugal, disponibilizados pelo LNEC. Para que todo o trabalho despendido nesta base de dados possa ser aproveitado futuramente, foi implementada de modo a que fosse possível e simples, quer introduzir novos dados, quer consultar a totalidade dos dados. Desta forma seria agilizado o acesso a toda a informação já existente e, também, à nova que pudesse vir a ser obtida, proporcionando uma melhor uniformização e organização dos dados.

Escolheu-se o programa Access® por ser um programa com grande capacidade para armazenamento e gestão de dados, preparado para relacionar e trabalhar listas complexas de dados. Este possui ferramentas que permitem relacionar diferentes tabelas permitindo a criação de tabelas dinâmicas, criação de consultas e formulários, geração de relatórios de dados e visualização dos mesmos em vários formatos. Para além destas funcionalidades principais, o programa ainda permite a importação e exportação de dados em vários formatos – por exemplo, exportação para formatos .xls, .txt, .htm, .csv, entre outros.

3.1 Enquadramento

Para a criação das redes neuronais a utilizar surgiram várias hipóteses. Inicialmente, optou-se por recorrer a uma *toolbox* incorporada no GNU¹ octave, que é o equivalente ao MATLAB® mas em regime aberto, e, posteriormente, mudou-se de linguagem e tentou-se criar um algoritmo em Java. Contudo, ambas as opções foram abandonadas, pois a criação de um algoritmo de inteligência artificial de raiz é algo que não se enquadra no âmbito da dissertação, sendo uma área não dominada pelo autor, optou-se por abandonar qualquer uma daquelas opções, apesar de se ter revelado enriquecedora a aprendizagem de ambas.

Em seguida experimentaram-se interfaces de utilizador, onde os algoritmos já estão construídos e apenas é necessário definir os parâmetros da rede neuronal que se vai utilizar. Existe uma oferta variada de programas para o desenvolvimento de redes neuronais com interface de utilizador, nomeadamente: *Brainmaker Neural Network Software*, *NeuroSolutions Infinity*, *Neuraltools*, *NeuralWorks Predicts®*, *NeuroXL Predictor*, *STATISTICA Automated Neural Networks* entre outros; mas todos apresentam custos de licenciamento demasiado elevados e, apesar de possuírem uma interface de mais fácil

¹ Para além de ser o nome dado a uma espécie de mamífero ungulado, GNU é um acrónimo recursivo de: *GNU is Not Unix* – GNU Não é Unix

utilização, não se considerou justificado o investimento significativo no licenciamento. Por essa razão, procurou-se trabalhar com programas *open source*, isto é, que permitem utilizar o programa nas suas totais funcionalidades sem ter de pagar qualquer licenciamento e com acesso ao código fonte, que pode ser alterado e adaptado. Quando foi feita a pesquisa de programas de desenvolvimento de RNA preparados para que a construção dos algoritmos seja parametrizada pelo utilizador, optou-se por ensaiar um pequeno conjunto de dados seleccionados do conjunto total a analisar para o caso de estudo. Esta etapa é detalhada na secção que se segue.

Programas utilizados

Primeiramente, trabalhou-se com o *WEKA – Waikato Environment for Knowledge Analysis*, desenvolvido pela Universidade de Waikato, na Nova Zelândia. Com este *software* e com o conjunto de dados a analisar, que eram só uma parte dos dados devido a problemas que o programa apresentou quando eram inseridos dados numa quantidade acima daquela que ele permite, obtiveram-se resultados que não foram interpretados, tal deve-se à sua inutilidade e ao facto de não fazerem qualquer sentido dentro daquilo que se pretendia. Posteriormente, depois de várias tentativas falhadas resultantes do problema referido anteriormente, chegou-se à conclusão que a maneira como os dados estavam a ser inseridos no programa não era a correta e, por essa razão, era impossível ao programa obter os resultados pretendidos. Contudo e mesmo após a inserção dos dados ter sido alterada e se tentar, novamente, obter resultados, observou-se que estes continuavam a não ser significativos. Assim, apesar do *Weka* apresentar uma interface bastante apelativa a nível de utilização, verificou-se que não era fácil controlar todos os parâmetros que controlavam o comportamento da RNA, tais como: a taxa de aprendizagem, a inércia e a quantidade de neurónios escondidos que compõe uma rede deste tipo, que serão discutidos com mais detalhe na secção 3.2. Para além disso, depois de se obterem resultados, não se conseguiu garantir a sua fiabilidade e nem foi possível a sua comparação com os dados de teste. Desta forma, optou-se por mudar de programa.

Por último, depois de outras tentativas menos significativas com o *Simbrain®* e o *Joone®* tentou-se utilizar o *Neuroph Studio*. Este programa foi criado e desenvolvido no laboratório de inteligência artificial da Faculdade de Ciências Organizacionais da Universidade de Belgrado, na Sérvia. Baseado no *Neuroph Framework*, o *Neuroph Studio* é uma ferramenta de desenvolvimento em Java para a criação de RNA.

Com um sistema de criação de RNA bastante intuitivo, o *Neuroph Studio*, permite a sua construção automática, através de um sistema de treino inteligente – designado de *training wizard*. Neste sistema, ao se inserirem os dados e seleccionar um intervalo de valores para cada parâmetro de entre um conjunto de hipóteses: *learning rate*, *hidden neurons*, *training set percents*, *max. iterations*, *max. error* e *cross validation repeat count*; o programa constrói três redes com diferentes parâmetros e treina-as com base nos dados inseridos, tendo como *Output* final as três redes treinadas e o seu respetivo erro total. Desta maneira, pode ser seleccionada aquela que apresentar o menor erro total. De seguida, basta testá-la com os dados de estudo e verificar se o erro total desse teste corresponde àquele que era pretendido. Caso esse erro não seja aquele que previamente se andava à procura, o programa permite que sejam feitos “treinos” na rede onde podem ser novamente alterados os parâmetros, para que os pesos possam ser ajustados para uma melhor resposta da rede, os conceitos de treino e pesos serão desenvolvidos detalhadamente na secção 3.2. Consegue-se, assim, diminuir o erro total da rede e, consequentemente, diminuir o erro obtido quando se volta a testar a rede com os dados em estudo. Este novo programa, bem mais simples e intuitivo que os anteriores, começou logo por apresentar resultados com um pequeno teste feito com uma operação lógica: *OU exclusivo* ou *disjunção exclusiva*, ou mais geralmente conhecido por XOR. A *disjunção exclusiva* é uma operação sobre dois ou mais valores lógicos, donde apenas resulta um valor verdadeiro se a quantidade de operadores verdadeiros for em número ímpar. Para esta situação utilizou-se a Tabela de Verdade da função XOR – ver Figura 3.1 - em que as duas primeiras colunas foram consideradas como *inputs* e a coluna de resultados como *Output* desejado. Ao serem testados, o programa conseguiu obter resultados adequados como se pode observar na Figura 3.1. Apesar disso, foi preciso algum tempo para conseguir descobrir como todas as suas funcionalidades executavam as tarefas que diziam fazer.

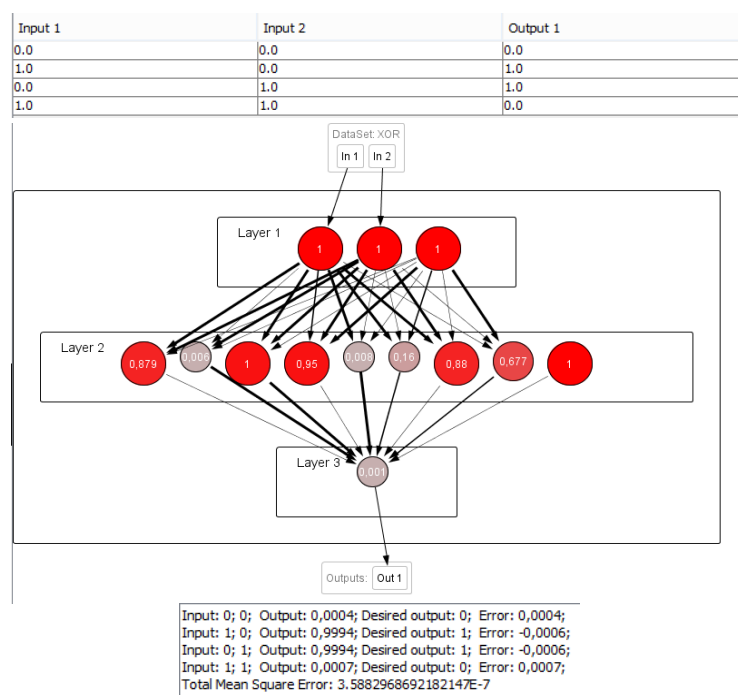


Figura 3.1 - Aspeto da aplicação da RNA – *Multi Layer Perceptron Backpropagation* com a operação lógica “OU exclusivo” no *Neuroph Studio*

3.2 Redes Neuronais Artificiais e *Multi Layer Perceptron Backpropagation*

3.2.1 Redes Neuronais Artificiais (RNA)

A inteligência artificial tem como objetivo conseguir construir ferramentas capazes de executar tarefas do foro cognitivo em áreas científicas onde, até ao momento, só o Homem era capaz de executar essas tarefas de uma maneira eficaz.

Estas ferramentas têm sido concebidas recorrendo a várias teorias e conceitos desenvolvidos na área das ciências matemáticas e computacionais. Dentro delas, existem as RNA que, muito rudimentarmente, podem ser definidas como a implementação de uma rede de circuitos, que tem o intuito de simular o funcionamento de uma rede neuronal verdadeira, isto é, aquelas redes neuronais que se podem encontrar no corpo humano, mais precisamente no cérebro e em todos os neurónios espalhados pelo corpo (adaptado de *Sousa et al.*, 2008).

Uma RNA é normalmente constituída por:

- elementos simples (neurónios);
- ligações entre neurónios;
- interação entre neurónios.

Elas caracterizam-se por terem ligações direcionadas, com várias camadas de processamento. Estão ligadas por conexões, que têm pesos diferentes, os quais vão atuar sobre os dados que passam através delas, possibilitando que a rede se torne muito flexível, conseguindo, assim, adaptar-se a variações significativas dos *inputs*. A maioria das redes possui uma regra de treino, que vai fazer variar os pesos das conexões consoante os valores-padrão que o utilizador inserir na sua construção, ou seja, as redes vão aprender com aquilo que lhes é “ensinado” pelos valores-padrão fornecidos.

Uma das vantagens da utilização das RNA é o facto de estas serem bastante resistentes a dados que contêm demasiada informação desnecessária, ou seja, são capazes de conseguir criar artificialmente

uma resposta cognitiva eficaz. Como as redes neuronais têm como resultado valores contínuos, estes podem ser utilizados para estimar ou prever resultados. Contudo, as redes neuronais são significativamente complexas e difíceis de entender através de uma interpretação humana, não existindo assim regras bem definidas que possam ser vistas e alteradas pelo utilizador quando necessário. Para além disso, para que estas funcionem de maneira adequada, precisam de um treino dos dados demorados, para que estes possam ser utilizados da melhor maneira e a previsão resultante seja a melhor possível.

O processo de implementação das RNA baseia-se em três etapas (adaptado de Carvalho, 2009):

- Processamento de informação – Processo de organização e uniformização dos dados, para permitir a sua utilização quando aplicado um algoritmo (pela RNA);
- Identificação de erros - Processo de identificação dos erros através da comparação entre aquilo que se pretende obter e aquilo que o algoritmo obtém;
- Aprendizagem – Depois de identificados os erros, passa a existir um processo em que há a modificação dos parâmetros de aprendizagem, com objetivo de diminuir o erro final. Desta forma procura-se conseguir obter um resultado para um erro mínimo, otimizando assim a solução que o algoritmo dá. Esta capacidade para aprender e, através dela, conseguir melhorar os resultados obtidos, é a principal e mais importante característica das RNA.

A maneira como as RNA aprendem varia, por isso existem vários métodos de aprendizagem (adaptado de Oliveira, n.d.):

- Aprendizagem por reforço/recompensa – a rede não tem conhecimento dos valores de *Output* desejados, em vez disso são-lhe atribuídas pontuações que são baseadas no facto de os resultados serem ou não interessantes. Ou seja, quando o resultado está próximo do desejado a rede recebe uma pontuação alta, caso contrário a pontuação atribuída é baixa. As redes que se inserem dentro deste método são: a RNA de *Hebb* e a RNA de *Hopfield*;
- Aprendizagem supervisionada – a rede tem a capacidade de produzir uma resposta com base na configuração inicial imposta e nos valores de *Output* desejados que lhe são apresentados inicialmente. Caso o resultado obtido pela rede seja semelhante aos valores de *Output* desejado então a rede termina o treino, caso contrário, a rede procede à alteração dos pesos das conexões com base nas diferenças entre os valores de *Output* desejados e os valores do resultado. As redes que se inserem dentro deste método são: a RNA *Perceptron* e a RNA *Backpropagation*;
- Aprendizagem não supervisionada – a rede adapta-se por si própria aos valores de *input* baseando-se apenas nas regras definidas para o seu funcionamento. Neste tipo de aprendizagem a rede não tem qualquer conhecimento dos valores de *Output* desejados. As redes que se inserem dentro deste método são: a RNA Competitiva e a RNA de *Kohonen*;

As redes neuronais podem ser classificadas quanto à sua arquitetura, dividindo-se em três grupos (adaptado de Brito, 2006):

- Redes totalmente conectadas – redes onde cada neurónio que compõe a rede está ligado a todos os outros neurónios que também a compõem;
- Redes de camada única – redes compostas por uma camada de entrada e uma camada de saída que podem ser treinadas independentemente. Este tipo de redes é útil para situações onde as variáveis em estudos são linearmente independentes;
- Redes multicamada – redes compostas por três grupos de camadas, a camada de entrada, as camadas escondidas e a camada de saída. Cada camada constituinte da RNA multicamada tem a seguinte função (adaptado de Pozo, n.d.):

- *Camada de entrada* - zona onde são apresentados os valores-padrão;
- *Camadas escondidas* - camada ou camadas onde são processados todos os dados, de forma a extrair a informação contida que é importante. A informação é processada de maneira a que se consigam identificar todas as características dos dados que irão facilitar a obtenção de resultados;
- *Camada de saída* – que apresenta os resultados finais de todo o processo de aprendizagem e onde, geralmente, no caso da aprendizagem supervisionada, se encontram os valores de *Output* desejados. É nesta camada que os valores de *Output* obtidos são comparados com os valores de *Output* desejados.

As redes neuronais *Multi Layer Perceptron Backpropagation* fazem parte do método de aprendizagem supervisionada e são redes multicamada, necessitando de uma grande quantidade significativa de dados de treino. É obrigatório que neste conjunto de dados esteja a variável principal, ou seja, aquela que se pretende prever. Como os dados vão passar, um a um, pela rede, irá também obter-se uma resposta por cada um dos dados de entrada. A escolha deste tipo de rede, *Perceptron Backpropagation*, nesta dissertação deve-se ao facto de existir uma significativa quantidade de valores medidos que permitem a utilização do método de aprendizagem supervisionada. A escolha de uma rede multicamada prende-se com o facto de já se ter comprovado que este tipo de redes obtém, geralmente, os resultados mais adequados. De seguida, na secção 3.2.2, apresenta-se detalhadamente como funcionam este tipo de RNA.

3.2.2 *Multi Layer Perceptron Backpropagation* (MLPBP)

As MLPBP, através de um processo iterativo, conseguem ajustar os pesos das conexões, de maneira a que variação aconteça consoante a necessidade de atingir um resultado mais próximo daquele que foi decidido inicialmente como valor-padrão. A aprendizagem termina, normalmente, quando os objetivos definidos pelo utilizador são atingidos, ou quando os resultados estão muito próximos disso.

O objetivo mais importante a atingir é o erro mínimo, que permite a criação de valores genéricos para qualquer situação que seja apresentada à rede. Neste tipo de redes, para se conseguir medir a fiabilidade dos *Outputs*, é normalmente aplicada a média do somatório dos erros quadráticos. Mas o problema surge quando não é possível conhecer quais os pesos ótimos nas conexões para que a rede consiga retirar o valor mais pequeno do erro quadrático médio – EQM. Estes valores desconhecidos são definidos pela rede com base nos dados fornecidos. Contudo, devido à forma não linear da função de ativação sigmoide que a rede utiliza, não é possível encontrar uma solução correta e pré-definida que permita a ótima minimização do EQM. Este tipo de algoritmo, *backpropagation*, propaga o erro da previsão – *Output* desejado menos *Output* obtido – através da rede, distribuindo a “responsabilidade” deste pelas várias conexões por onde passa. Desta maneira, os pesos das conexões são ajustados para que o erro na próxima iteração possa ser diminuído. Este processo é feito com o auxílio do método do gradiente descendente (Larose & Larose, 2014).

Ao percorrer o gráfico do intervalo dos pesos *versus* o EQM e aplicando-lhe a derivada em cada ponto, o método do gradiente descendente pretende encontrar o ponto do gráfico onde a derivada é zero ou próximo dele. Desta forma consegue-se encontrar o valor do peso para o qual a RNA se deve deslocar para que o EQM seja mínimo. Assim pode aplicar-se este peso na sua respetiva conexão dentro da RNA. Este processo é feito pela rede em cada uma das suas conexões. (Larose & Larose, 2014)

O fluxograma da Figura 3.2 ilustra as várias etapas de processamento de uma rede neuronal do tipo *Multi Layer Perceptron Backpropagation*, que será a utilizada no caso de estudo desta dissertação.

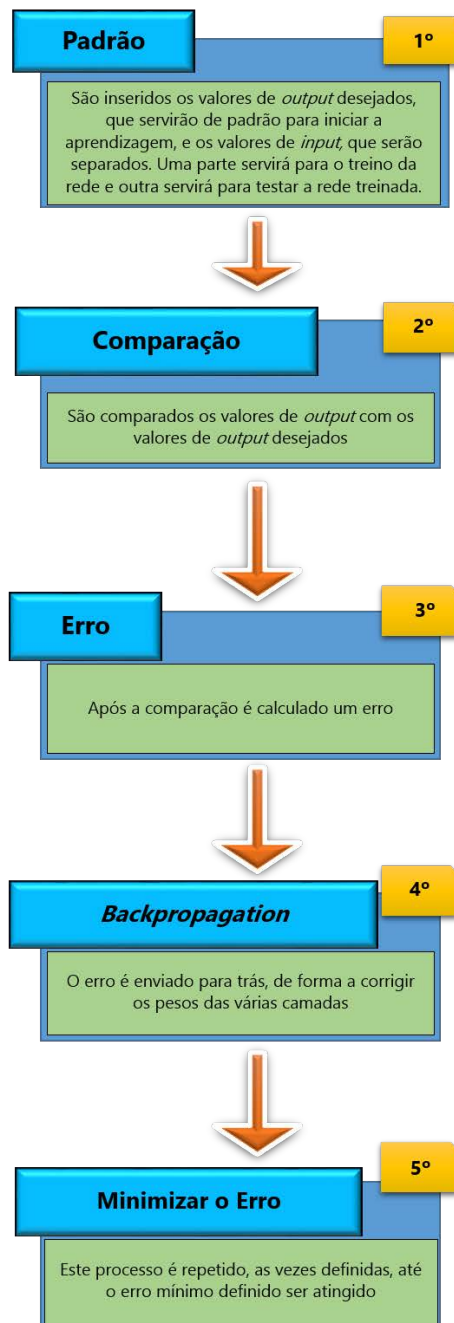


Figura 3.2 - Fluxograma do funcionamento de uma rede neuronal MLPBP

3.2.2.1 Critérios de paragem do treino

Devido ao facto de o tempo de treino das RNA ser, muitas vezes, algo demorado é necessário definir critérios de paragem do treino. Existindo vários critérios, que fazem sempre sentido, desde que sejam bem utilizados e seja justificada, de uma maneira clara, o porquê do critério utilizado, muitos programas trazem o seu próprio critério ou deixam como opção para o utilizador várias escolhas. Os mais utilizados são (Larose & Larose, 2014):

- Definir o número de iterações que o algoritmo faz;
- Definir um tempo real limite de aprendizagem;
- Definir um erro máximo que pode ser atingido – obrigando o programa a estar a treinar a rede até esse erro máximo ser atingido;
- Combinação dos critérios anteriores.

Infelizmente, caso o utilizador seja demasiado ambicioso ou demasiado rígido nos critérios que define, a rede pode não aprender devidamente, isto é, há uma tendência, devido ao facto destas redes serem bastante flexíveis, para que haja uma sobre previsão de valores de *Output*. Em certos casos, podem ser criados padrões idiossincráticos – a rede constrói uma maneira própria de reagir quando lhe são apresentados os dados de treino e apenas consegue trabalhar com estes – deixando de conseguir reagir a qualquer tipo de dados que entrem na rede e que à partida lhe são desconhecidos (*op. cit.*).

Normalmente, o método de treino das redes desenvolve-se da seguinte maneira:

- Guardar parte dos dados para validação da rede - *test set*;
- Os restantes dados - *training set*, são utilizados para treinar a rede;
- Depois de treinada, a rede executa um teste com o *test set*;
- Este conjunto de dados é ensaiado duas vezes: uma com os pesos utilizados no treino; outra com o valor mais baixo dos pesos obtido pelo ajustamento feito através do método do gradiente descendente;
- O objetivo é que a diferença entre os dois testes vá diminuindo à medida que a rede é treinada; quando o erro de treino se aproxima do mínimo do EQM o treino deve parar para que não haja uma sobrevalorização nas previsões.

Este tipo de critério pode levar a que a rede pare o treino num mínimo local e não num mínimo global. Por essa razão foram criadas duas variáveis que entram dentro da equação do EQM e que vão permitir alguns ajustes dos pesos e vão criar alguma inércia na equação, levando a que, de uma maneira mais fiável, a rede possa encontrar o mínimo global. São eles a taxa de aprendizagem – *learning rate (LR)* e a inércia – *momentum term (MT)* (*op. cit.*).

3.2.2.2 Variáveis que controlam aprendizagem da RNA

a) Taxa de Aprendizagem (LR)

A LR é uma constante com valores entre 0 e 1 que auxilia a rede a equilibrar os pesos das conexões, para que possa ser encontrado o mínimo global. Esta variável entra na equação do EQM, sendo multiplicada pelos pesos da rede. O problema põe-se quando se quer decidir qual o melhor valor de LR a utilizar na rede. Quando esta é muito pequena, a variação dos pesos é feita de uma forma lenta, o que leva a que a rede tenha um treino mais moroso até conseguir atingir os objetivos pretendidos. Ao utilizar-se uma LR demasiado elevada a rede pode “ultrapassar” o mínimo global, sem que assim se consiga atingir a solução ótima (*op. cit.*).

A melhor solução para a LR é permitir que o algoritmo a faça variar começando o treino com uma LR elevada e fazendo-a diminuir ao longo das iterações, de forma a que a derivada do EQM se aproxime do valor nulo, isto é, que o valor do EQM se aproxima de um mínimo (*op. cit.*).

b) Inércia (MT)

A MT é uma constante com valores entre 0 e 1 que, multiplicada pelo peso obtido na iteração anterior e adicionada ao novo peso recalculado, entra na equação como uma variável que vai criar inércia dentro do treino. Valores elevados de MT permitem ao algoritmo ter um intervalo de “conhecimento” maior, o que será útil para treinos posteriores. Inversamente, valores pequenos de MT reduzem o efeito de inércia que poderia existir, bem como dos ajustamentos efetuados nas iterações anteriores, mas podem fazer com que o treino termine num mínimo local. Sem a MT dentro da equação, deixa de existir qualquer inércia e, por essa razão, o treino decorre sem qualquer “salto” podendo por isso atingir apenas um mínimo local (*op. cit.*)

Na Figura 3.3 pode observar-se no gráfico da esquerda que com uma MT pequena o algoritmo para o treino atinge um valor mínimo (A), sem que consiga atingir o mínimo global (B); no gráfico da direita, verifica-se o contrário, com uma MT elevada o algoritmo pode “saltar” o mínimo global (B).

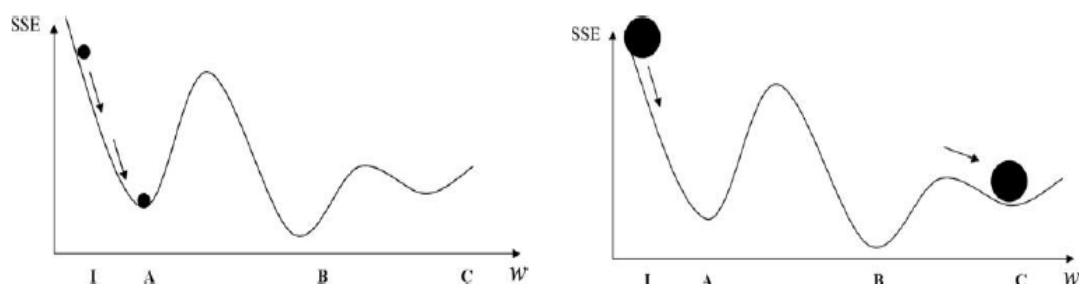


Figura 3.3 – Efeito da variação da MT na obtenção do mínimo global (Larose & Larose, 2014)

3.3 Base de dados realizada

Para poder elaborar esta base de dados, foi necessário aprender como utilizar o programa Access®. Foi por isso necessário estudar e perceber como elaborar tabelas dinâmicas, criando as respetivas relações, como criar consultas a partir dos dados introduzidos nas tabelas e, também, como construir relatórios que apresentassem os dados de uma forma mais acessível. Tal estudo foi importante para, em futuros trabalhos, saber como aproveitar algumas das possibilidades que um *software* tão útil como o Access® pode oferecer.

Os dados da observação de barragens a utilizar contemplam toda a informação relativa à maioria das cerca de 62 barragens de aterro em Portugal que foram avaliadas ou acompanhadas pelo LNEC. Há dados registados desde o final dos anos 60 (1969) até à atualidade (2014). Podem ser encontradas informações como: fotografias da fase de construção, fase de primeiro enchimento e, em certos casos, de reabilitação e de instrumentação; relatórios; notas técnicas; desenhos e dados de monitorização. De uma maneira geral, os dados de observação/monitorização, consistem em valores de pressões de água, deslocamentos superficiais, deslocamentos internos, caudais e níveis de água da albufeira. Para esta dissertação, considera-se a informação da barragem sob solicitações estáticas e, para simplificar a análise do respetivo comportamento, só se contemplaram os valores de pressões de água, os deslocamentos superficiais obtidos pelas marcas superficiais, os níveis de água da albufeira e os caudais medidos, uma vez que estes parâmetros são os que mais influenciam o comportamento de uma barragem de aterro.

A maneira como as bases de dados dos piezómetros e das marcas superficiais foram estruturadas e organizadas pode encontrar-se, com mais detalhe, no Anexo II.

Uma das primeiras dificuldades na realização da base de dados consistiu na obtenção da informação necessária para todas as barragens de aterro de Portugal. Os documentos disponibilizados pelo LNEC constituíam uma amálgama de dados pouco estruturados e incompletos. Para além disso, muitos dos dados estavam organizados de formas distintas usando, inclusive, unidades de medida diferentes. Por esta razão, nas situações em que estes valores não existiam ou em que não estavam nos dados disponibilizados pelo LNEC, foi criada uma forma de acesso à base de dados que permitirá aos futuros utilizadores completar ou corrigir os dados já introduzidos ou, simplesmente, acrescentar outros.

3.3.1 A organização dos dados

Em primeiro lugar, deve sublinhar-se que, nesta base de dados, apenas são considerados quatro dos valores medidos na monitorização das cerca de 62 barragens que se encontram nos dados fornecidos, eles são: os valores de pressões de água (piezómetros hidráulicos), os valores de deslocamentos superficiais (marcas superficiais), níveis de água das albufeiras e os caudais.

Numa primeira etapa, os dados fornecidos pelo LNEC foram inventariados barragem a barragem, e foi registada numa folha Excel® toda a informação, existente ou não, nas pastas referentes aos dados de cada uma delas. Isto permitiu que, logo à partida, tenham sido excluídas, por escassez ou inexistência de valores medidos, algumas das barragens que se encontravam nos dados. Este procedimento tornou possível, também, identificar os dados de interesse para a modelação a realizar.

Seguidamente, os dados foram processados e, posteriormente, inseridos na base de dados criada no Access®. O processamento consistiu na seleção e organização dos dados relevantes para o estudo em apreço e, em algumas situações, na sua conversão para a mesma unidade de medida. Para dados diferentes foram criadas tabelas diferentes e, posteriormente, estas foram ligadas através de relações. Desta forma, criaram-se tabelas dinâmicas que dão ao utilizador uma maior facilidade na gestão e manuseamento dos dados.

A terceira etapa consistiu na validação dos dados, fazendo-se a comparação entre os que tinham sido inseridos e os já existentes. Desta forma, foi possível a correção de alguns erros humanos cometidos na inserção da informação na base de dados.

Por último, foram criadas consultas que permitem o acesso mais simples a estes dados e que uniformizam a sua organização, permitindo ao utilizador aceder de modo mais rápido a qualquer informação que se encontre já registada na base de dados. Assim, é possível comparar valores de uma mesma barragem ao longo de várias datas. Foi criada ainda a possibilidade de imprimir um relatório com a informação resultante de cada uma destas consultas. Os relatórios podem ser impressos ou abertos em Excel®, o que facilita a sua ulterior utilização em programas que só aceitam certo tipo de ficheiros.

Os dados introduzidos (cerca de 84.839 medições) permitem ainda fazer outro tipo de consultas, nomeadamente o cruzamento de dados. Nestes cruzamentos podem ser utilizados os valores dos piezómetros e os valores dos deslocamentos superficiais das cerca de 22 barragens de aterro, referentes às marcas superficiais, e das 39 barragens de aterro, referentes às pressões de água.

3.3.2 Descrição da base de dados

Nesta secção descreve-se, sumariamente, a organização e o funcionamento da base de dados criada. Nas Figuras 3.4 e 3.5 apresentam-se as relações, criadas, em cada uma das base de dados, que permitiram realizar todos processos descritos em seguida.

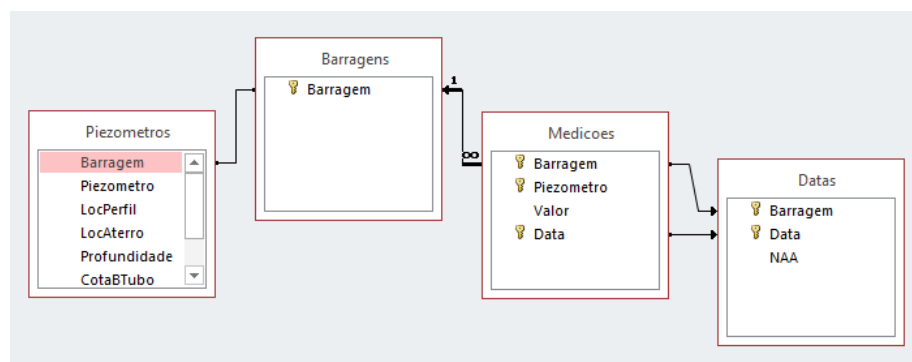


Figura 3.4 - Relações das tabelas da base de dados dos piezómetros

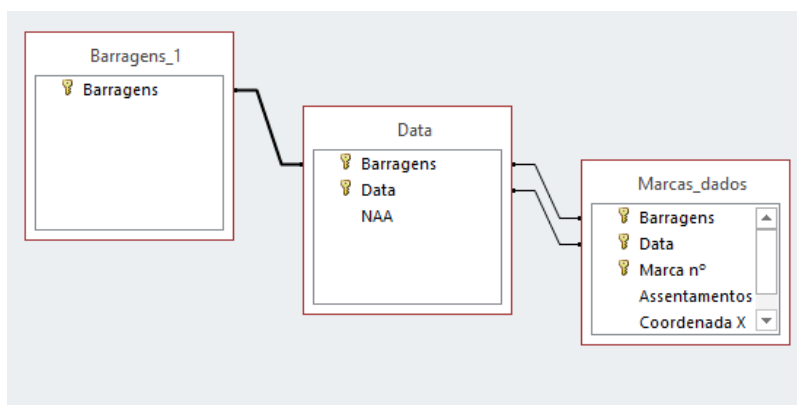


Figura 3.5 - Relações das tabelas da base de dados das marcas superficiais

3.3.2.1 Tabelas

Quer para os valores dos piezómetros, quer para os valores das marcas superficiais, começou-se por introduzir na base de dados o nome das barragens existentes, em seguida as datas das medições efetuadas em cada uma das barragens e, finalmente, os valores destas medições para cada um dos piezómetros e para cada uma das marcas superficiais.

No caso dos piezómetros, ao abrir a base de dados obtém-se as seguintes opções ilustradas na Figura 3.6.

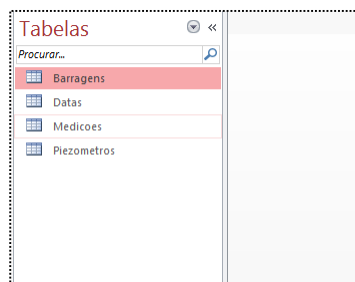


Figura 3.6 - Menu tabelas da base de dados piezómetros

Selecionando a tabela “Barragens” obtém-se a tabela da Figura 3.7.

| Tabelas | |
|-------------|--|
| Procurar... | |
| Barragens | |
| Datas | |
| Medicoes | |
| Piezometros | |

| Barragens | |
|-----------------|-----------------------|
| Barragem | Clicar para Adicionar |
| Abrilongo | |
| Alamos1 | |
| Alamos2 | |
| Alamos3 | |
| Alcoutim | |
| Alijo | |
| Alvito | |
| Beliche | |
| Cala | |
| Capinha | |
| CoutadaTamujais | |
| Enxoe | |
| Escarigo | |
| Fonte-Serne | |
| Lapao | |
| Loureiro | |
| Lucifecit | |
| MalhadadoPeres | |
| Marateca | |
| Melmoo | |
| Minutos | |
| Mira | |
| MontadaRocha | |
| Morgavel_1_23 | |
| Morgavel23_40 | |
| Odeleite | |
| Odelouca_1 | |

Figura 3.7 Tabela “Barragens” – base de dados piezómetros

Nessa tabela pode-se escolher uma barragem, por exemplo, na Figura 3.8, a de Lapão, acedendo-se, assim, a uma nova tabela em que constam todas as datas em que foram feitas as medições nos piezómetros dessa barragem.

| Barragem | Fonte-Serne | Lapao |
|------------|-------------|---------------|
| Data | NAA | Clicar para / |
| 06/07/2001 | 0.00 | |
| 13/07/2001 | 0.00 | |
| 20/07/2001 | 0.00 | |
| 30/07/2001 | 0.00 | |
| 03/08/2001 | 0.00 | |
| 10/08/2001 | 0.00 | |
| 16/08/2001 | 0.00 | |
| 20/09/2001 | 0.00 | |
| 27/09/2001 | 0.00 | |
| 03/10/2001 | 0.00 | |
| 10/10/2001 | 0.00 | |
| 16/10/2001 | 0.00 | |
| 23/10/2001 | 0.00 | |
| 31/10/2001 | 0.00 | |
| 08/11/2001 | 0.00 | |
| 21/11/2001 | 0.00 | |
| 03/12/2001 | 0.00 | |
| 20/05/2002 | 0.00 | |
| * | 0.00 | |

Loureiro
Lucifecit
MalhadadoPeres
Marateca
Meimoa
Minutos
Mira
MontedaRocha
Morgavel_1_23

Figura 3.8 - Seleção por barragem – exemplo da organização das barragens na base de dados

Dentro da tabela da barragem, pode-se seleccionar uma das várias datas disponíveis, por exemplo 10/08/2001, e obtém-se a tabela que tem, para cada um dos piezómetros dessa barragem, os valores medidos na data escolhida (Figura 3.9).

| Barragem | Fonte-Serne | Lapao |
|------------|-------------|---------------|
| Data | NAA | Clicar para / |
| 03/08/2001 | 0.00 | |
| 10/08/2001 | 0.00 | |
| 16/08/2001 | 0.00 | |
| 20/09/2001 | 0.00 | |
| * | 0.00 | |

Loureiro
Lucifecit
MalhadadoPeres
Marateca
Meimoa
Minutos
Mira
MontedaRocha
Morgavel_1_23

Figura 3.9 - Seleção por data – exemplo da organização das datas da base de dados

De forma análoga e fazendo este mesmo processo na base de dados das marcas superficiais, obtêm-se os valores de assentamento para cada uma das barragens e suas respectivas marcas superficiais, já convertidos para metros.

3.3.2.2 Consultas pré-definidas

Nas consultas geradas, relativamente aos dados dos piezómetros, podem-se encontrar as possibilidades ilustradas na Figura 3.10.

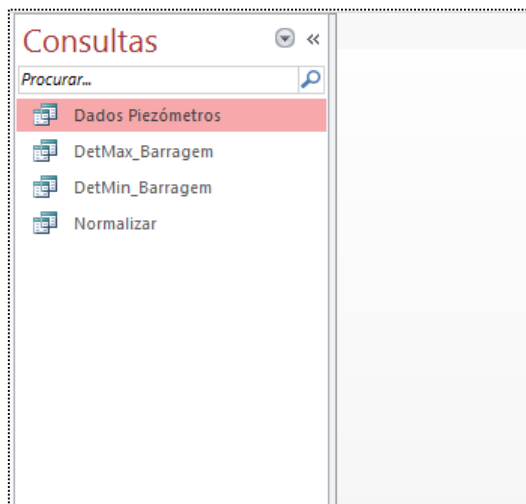


Figura 3.10 - Menu consultas de base de dados piezómetros

Ao seleccionar as consultas **DetMax_Barragem** ou **DetMin_Barragem**, obtém-se, respetivamente, uma tabela com a listagem de todas as barragens estudadas e, para cada uma delas, o valor máximo e o valor mínimo medidos. Estas duas consultas foram construídas para, simplesmente, se obter de uma maneira rápida os valores máximos e os valores mínimos das medições para cada piezómetro.

Se, por outro lado, se optar por seleccionar a consulta **Dados Piezómetros** é pedido ao utilizador que digite o nome da barragem que pretende analisar (ver Figura 3.11). Esta consulta pretende simplificar a navegação pela base de dados, sendo assim mais fácil aceder aos dados técnicos dos piezómetros para cada uma das barragens.

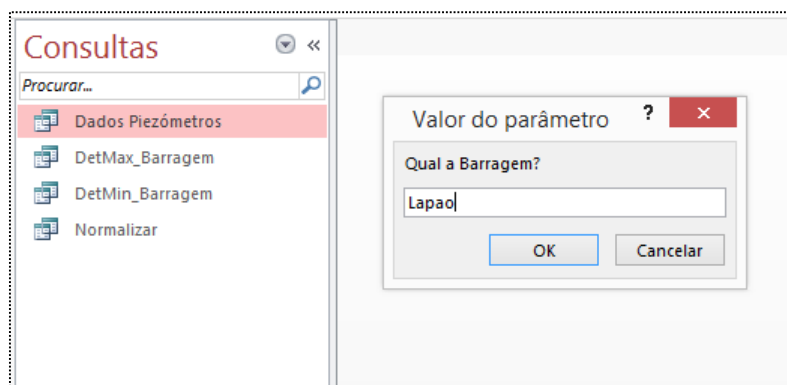


Figura 3.11 - Consulta Dados Piezómetros - dados técnicos dos piezómetros

Ao inserir o nome pretendido obtém-se a ficha dos dados técnicos dos piezómetros da barragem escolhida (Figura 3.12).

| Barragem | Piezometro | LocPerfil | LocAterro | Profundidad | CotaBTubo | Cota PPoros | Observação |
|----------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|------------|
| Lapao | P1 | Perfil 7 | Jusante | 41.68 | 66.89 | 25.21 | |
| Lapao | P10 | Perfil 9 | Jusante | 55.58 | 70.15 | 14.57 | |
| Lapao | P11 | Perfil 9 | Jusante | 38.27 | 69.93 | 31.66 | |
| Lapao | P12 | Perfil 9 | Jusante | 24.21 | 69.95 | 45.74 | |
| Lapao | P13 | Perfil 9 | Jusante | 40.38 | 66.32 | 25.94 | |
| Lapao | P14 | Perfil 9 | Jusante | 16.17 | 66.29 | 50.12 | |
| Lapao | P15 | Perfil 9 | Jusante | 32.31 | 62.42 | 30.11 | |
| Lapao | P16 | Perfil 9 | Jusante | 22.22 | 62.42 | 40.20 | |
| Lapao | P17 | Perfil 9 | Jusante | 24.34 | 55.41 | 31.07 | |
| Lapao | P18 | Perfil 10 | Jusante | 41.56 | 66.00 | 24.44 | |
| Lapao | P19 | Perfil 10 | Jusante | 31.60 | 66.02 | 34.42 | |
| Lapao | P2 | Perfil 7 | Jusante | 32.54 | 66.96 | 34.42 | |
| Lapao | P20 | Perfil 10 | Jusante | 16.26 | 66.00 | 49.74 | |
| Lapao | P3 | Perfil 7 | Jusante | 12.73 | 67.08 | 54.35 | |
| Lapao | P4 | Perfil 7 | Jusante | 28.33 | 63.82 | 35.49 | |
| Lapao | P5 | Perfil 7 | Jusante | 19.23 | 63.78 | 44.55 | |
| Lapao | P6 | Perfil 7 | Jusante | 14.41 | 55.39 | 40.98 | |
| Lapao | P7 | Perfil 9 | Montante | 45.66 | 69.94 | 24.28 | |
| Lapao | P8 | Perfil 9 | Montante | 30.26 | 69.98 | 39.72 | |
| Lapao | P9 | Perfil 9 | Montante | 16.26 | 69.93 | 53.67 | |

Figura 3.12 - Resultado exemplo da consulta Dados Piezómetros

Pode ainda optar-se por seleccionar a consulta **Normalizar**. Nesse caso, é novamente pedido ao utilizador que digite o nome da barragem que pretende analisar. Ao inserir o nome da barragem, o utilizador irá obter uma tabela (Figura 3.13) com várias colunas, que sintetiza as informações já obtidas e normaliza, os valores medidos para a barragem em causa. A normalização é feita através de uma função básica de normalização desenvolvida num módulo com o auxílio do *Visual Basic®*.

| Barragem | MinDeValor | MaxDeValor | Piezometro | Data | Valor | ValorNormalizado |
|----------|------------|------------|------------|------------|-------|------------------|
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P9 | 06/07/2001 | 69.93 | 0.985 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P7 | 06/07/2001 | 69.94 | 0.986 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P6 | 06/07/2001 | 55.39 | 0.000 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P5 | 06/07/2001 | 63.78 | 0.568 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P4 | 06/07/2001 | 63.82 | 0.571 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P3 | 06/07/2001 | 67.08 | 0.792 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P20 | 06/07/2001 | 66.00 | 0.719 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P10 | 06/07/2001 | 70.15 | 1.000 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P19 | 06/07/2001 | 66.02 | 0.721 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P8 | 06/07/2001 | 69.98 | 0.989 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P1 | 06/07/2001 | 66.89 | 0.780 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P2 | 06/07/2001 | 66.96 | 0.784 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P18 | 06/07/2001 | 66.00 | 0.719 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P13 | 06/07/2001 | 66.32 | 0.741 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P16 | 06/07/2001 | 62.42 | 0.477 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P11 | 06/07/2001 | 69.93 | 0.985 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P15 | 06/07/2001 | 62.42 | 0.477 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P12 | 06/07/2001 | 69.95 | 0.987 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P14 | 06/07/2001 | 66.29 | 0.739 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P17 | 06/07/2001 | 55.41 | 0.002 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P7 | 13/07/2001 | 69.94 | 0.986 |
| Lapao | 55.385 | 70.145 | P11 | 13/07/2001 | 69.93 | 0.985 |

Figura 3.13 - Resultado exemplo da consulta Normalizar

Quando o utilizador executa a consulta **Normalizar** esta vai “buscar” a função N que primeiro recolhe o máximo e o mínimo dos valores para a barragem seleccionada, através das consultas **DetMax_Barragem** e **DetMin_Barragem** e depois executa a normalização dos valores de pressão de água da barragem escolhida. A função definida encontra-se na Figura 3.14, com as seguintes variáveis:

```
Function N(x, max, min) As Double

maxnorm = 0.9
minnorm = 0.1

N = ((maxnorm - minnorm) * ((x - min)) / ((max - min))) + minnorm

End Function
```

Figura 3.14 - Definição da função N em Visual Basic®

- *maxnorm* – valor máximo do intervalo de normalização;
- *minnorm* – valor mínimo do intervalo de normalização;
- *max* – valor máximo das medições, obtido pela consulta **DetMax_Barragem** para a barragem escolhida;
- *min* – valor mínimo das medições, obtido pela consulta **DetMax_Barragem** para a barragem escolhida;
- *x* – valor que se pretende normalizar.

Na consulta construída **Marcas_dados Consulta**, relativamente às marcas superficiais, pode ser encontrada a seguinte possibilidade (Figura 3.15).

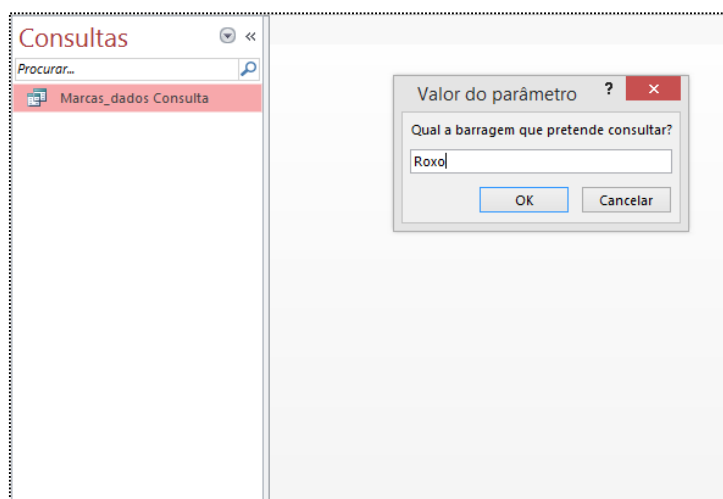


Figura 3.15 - Consulta Marcas_dados Consulta – dados das Marcas superficiais

Esta consulta permite obter os dados referentes às marcas superficiais da barragem que o utilizador escolher. Neste caso (Figura 3.15) a barragem escolhida é a de Roxo, obtendo-se o seguinte resultado (Figura 3.16):

| Barragens | Data | Marca nº | Assentamer |
|-----------|------------|--------------|------------|
| Roxo | 15/01/1982 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 15/07/1982 | BANQUETA-M12 | -0.0040 |
| Roxo | 20/07/1983 | BANQUETA-M12 | -0.0040 |
| Roxo | 06/12/1983 | BANQUETA-M12 | -0.0030 |
| Roxo | 14/05/1984 | BANQUETA-M12 | -0.0050 |
| Roxo | 27/11/1984 | BANQUETA-M12 | -0.0040 |
| Roxo | 21/02/1985 | BANQUETA-M12 | 0.0020 |
| Roxo | 02/07/1986 | BANQUETA-M12 | -0.0110 |
| Roxo | 17/09/1986 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 24/10/1986 | BANQUETA-M12 | -0.0070 |
| Roxo | 17/11/1986 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 12/12/1986 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 22/01/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 17/02/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 18/03/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 23/04/1987 | BANQUETA-M12 | -0.0110 |
| Roxo | 22/05/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 22/06/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 21/07/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 20/08/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 24/09/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 23/10/1987 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |

Figura 3.16 - Resultado exemplo da consulta Marcas_dados Consulta

3.3.2.3 Relatórios

Nesta base de dados existe a possibilidade de obter dois relatórios distintos. Cada um destes relatórios pode ser obtido a partir do nome da barragem introduzido pelo utilizador. O primeiro, **Dados Piezómetros**, elabora uma versão para imprimir da consulta com o mesmo nome (Figura 3.17)

| Barragem | Piezometro | LocPerfil | LocAterro | Profundidade | CotaBTubo | Cota PPorosa | Observações |
|----------|------------|-----------|-----------|--------------|-----------|--------------|-------------|
| Lapao | P1 | Perfil 7 | Jusante | 41.68 | 66.89 | 25.21 | |
| | P10 | Perfil 9 | Jusante | 55.58 | 70.15 | 14.57 | |
| | P11 | Perfil 9 | Jusante | 38.27 | 69.93 | 31.66 | |
| | P12 | Perfil 9 | Jusante | 24.21 | 69.95 | 45.74 | |
| | P13 | Perfil 9 | Jusante | 40.38 | 66.32 | 25.94 | |
| | P14 | Perfil 9 | Jusante | 16.17 | 66.29 | 50.12 | |
| | P15 | Perfil 9 | Jusante | 32.31 | 62.42 | 30.11 | |
| | P16 | Perfil 9 | Jusante | 22.22 | 62.42 | 40.20 | |
| | P17 | Perfil 9 | Jusante | 24.34 | 55.41 | 31.07 | |
| | P18 | Perfil 10 | Jusante | 41.56 | 66.00 | 24.44 | |
| | P19 | Perfil 10 | Jusante | 31.60 | 66.02 | 34.42 | |
| | P2 | Perfil 7 | Jusante | 32.54 | 66.96 | 34.42 | |
| | P20 | Perfil 10 | Jusante | 16.26 | 66.00 | 49.74 | |
| | P3 | Perfil 7 | Jusante | 12.73 | 67.08 | 54.35 | |
| | P4 | Perfil 7 | Jusante | 28.33 | 63.82 | 35.49 | |

Figura 3.17 - Relatório exemplo – “Dados Piezómetros”

O segundo, **NormalizarDados**, elabora também uma versão para imprimir da consulta **Normalizar** (Figura 3.18).

| Barragem | Data | Piezometro | Valor | Valor Normalizado |
|----------|------------|------------|-------|-------------------|
| Lapao | 06/07/2001 | P1 | 66.89 | 0.780 |
| Lapao | 06/07/2001 | P10 | 70.15 | 1.000 |
| Lapao | 06/07/2001 | P11 | 69.93 | 0.985 |
| Lapao | 06/07/2001 | P12 | 69.95 | 0.987 |
| Lapao | 06/07/2001 | P13 | 66.32 | 0.741 |
| Lapao | 06/07/2001 | P14 | 66.29 | 0.739 |
| Lapao | 06/07/2001 | P15 | 62.42 | 0.477 |
| Lapao | 06/07/2001 | P16 | 62.42 | 0.477 |
| Lapao | 06/07/2001 | P17 | 55.41 | 0.002 |
| Lapao | 06/07/2001 | P18 | 66.00 | 0.719 |
| Lapao | 06/07/2001 | P19 | 66.02 | 0.721 |
| Lapao | 06/07/2001 | P2 | 66.96 | 0.784 |
| Lapao | 06/07/2001 | P20 | 66.00 | 0.719 |
| Lapao | 06/07/2001 | P3 | 67.08 | 0.792 |
| Lapao | 06/07/2001 | P4 | 63.82 | 0.571 |
| Lapao | 06/07/2001 | P5 | 63.78 | 0.568 |

Figura 3.18 - Relatório exemplo – “NormalizarDados”

Para as marcas superficiais existe apenas um relatório possível de imprimir que é aquele que corresponde à consulta criada para visualizar os dados das marcas superficiais de uma barragem à escolha do utilizador. Seleccionando novamente a barragem de Roxo, obtém-se o seguinte relatório (Figura 3.19):

| Barragem | Data | Localização / Marca nº | Assentamentos |
|----------|------------|------------------------|---------------|
| Roxo | 15/01/1982 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 15/07/1982 | BANQUETA-M12 | -0.0040 |
| Roxo | 20/07/1983 | BANQUETA-M12 | -0.0040 |
| Roxo | 06/12/1983 | BANQUETA-M12 | -0.0030 |
| Roxo | 14/05/1984 | BANQUETA-M12 | -0.0050 |
| Roxo | 27/11/1984 | BANQUETA-M12 | -0.0040 |
| Roxo | 21/02/1985 | BANQUETA-M12 | 0.0020 |
| Roxo | 02/07/1986 | BANQUETA-M12 | -0.0110 |
| Roxo | 17/09/1986 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |
| Roxo | 24/10/1986 | BANQUETA-M12 | -0.0070 |
| Roxo | 17/11/1986 | BANQUETA-M12 | 0.0000 |

Figura 3.19 - Relatório exemplo – “Assentamentos medidos pelas marcas superficiais”

3.3.3 Limitações do *software* Access®

O Access® apresenta algumas limitações a nível do manuseamento e da inserção de dados. O software não é muito simples de utilizar e, para se conseguir trabalhar de uma maneira rápida e eficaz, ele não é, muitas vezes, a melhor opção. Para além de não ter uma interface utilizador-computador fácil e intuitiva, existem muitos comandos rápidos que só com a experiência de várias horas de utilização se conseguem encontrar e dar-lhes o uso devido.

Existem algumas limitações em relação à quantidade de dados a manusear, e também ao nível do número de colunas que podem ser inseridas numa tabela. O sistema de arredondamentos do Access® não é muito fiável, pois números aparentemente iguais parecem ter arredondamentos diferentes em variadas situações. Os arredondamentos nem sempre são feitos como é suposto, pelo que frequentemente é necessário criar uma função em *Visual Basic*® para que estes sejam executados da maneira pretendida, isto é, procurando ou desenvolvendo um pequeno algoritmo que arredonde os valores adequadamente.

Para além destas limitações mais práticas existem vários “bugs” de *software* que não facilitam a inserção de dados. Por exemplo, se, por alguma razão os dados inseridos não são do tipo definido para aquela coluna, o programa dá erro e muitas vezes reinicia ou bloqueia, principalmente quando a quantidade de dados que já foram inseridos for elevada. É ainda de relevar que durante o processo de criação das bases de dados surgiram alguns “bugs” que não foram possíveis de resolver nem sequer detetar a sua fonte. Perante estas situações foi necessário iniciar uma nova base de dados e construir de novo aquela que existia, através da importação das tabelas, consultas e relatórios.

4 Caso de estudo

Neste capítulo descreve-se, numa primeira parte e de uma forma geral, a barragem selecionada para o estudo. Referem-se os resultados da aplicação da RNA, onde podem ser observados os erros quadráticos médios – EQM, para cada uma das RNA feitas para as grandezas em estudo: valores de pressão de água, caudais e deslocamentos superficiais (assentamentos). Apresentam-se ainda os gráficos dos valores calculados *versus* valores medidos do pior e do melhor resultados para cada grandeza, que permitem aferir, de uma forma visual, a capacidade de adaptação do modelo aos valores medidos. Estes gráficos vêm acompanhados por um outro gráfico que permite avaliar a dispersão dos dados por comparação da linha de tendência dos valores com a reta dos 45°. Ou seja, caso os valores medidos fossem iguais aos valores calculados, todos esses valores encontrar-se-iam em cima da reta dos 45°, isto é, o ajustamento do modelo relativamente aos valores medidos seria perfeito. Quanto maior o afastamento dos pontos relativamente à reta, maior é a discrepância entre os valores medidos e os valores calculados. Caso se verifique esta discrepância apenas em algumas zonas da nuvem de pontos, tal pode indicar várias situações:

- a recolha dos dados nessa zona não foi feita da forma adequada;
- o equipamento de medição poderia estar com algum problema técnico;
- ou, simplesmente, a modelação não conseguiu fazer a devida aproximação à situação esperada nessas zonas.

Caso nenhum valor esteja próximo da reta dos 45°, isso é indicativo de que a modelação não se conseguiu adaptar aos valores medidos e, por essa razão, o modelo não é representativo da realidade.

4.1 Barragem Valtorno-Mourão

4.1.1 Descrição geral

A Barragem de Valtorno-Mourão (Figura 4.1), localizada em Trás-dos-Montes, insere-se no concelho de Vila Flor e está a funcionar desde Maio de 2006. Construída com o intuito de fornecer água à população do concelho de Vila Flor e, posteriormente, reforçar o abastecimento da Barragem de Fonte Longa, localizada no concelho de Carrazeda de Ansiães, a sudoeste do concelho de Vila Flor, esta barragem intersecta a Ribeira de Valtorno.



Figura 4.1 - Imagem aérea da barragem de Valtorno-Mourão – retirada do Google Earth a 18 de março de 2015

Com uma altura máxima acima da fundação de 32 m, um coroamento de 150 metros de extensão e uma largura de 6 m, esta barragem foi projetada para suportar um volume de cerca de $1,12 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água na sua albufera. Na Figura 4.2 pode ser observado um perfil transversal tipo da barragem.

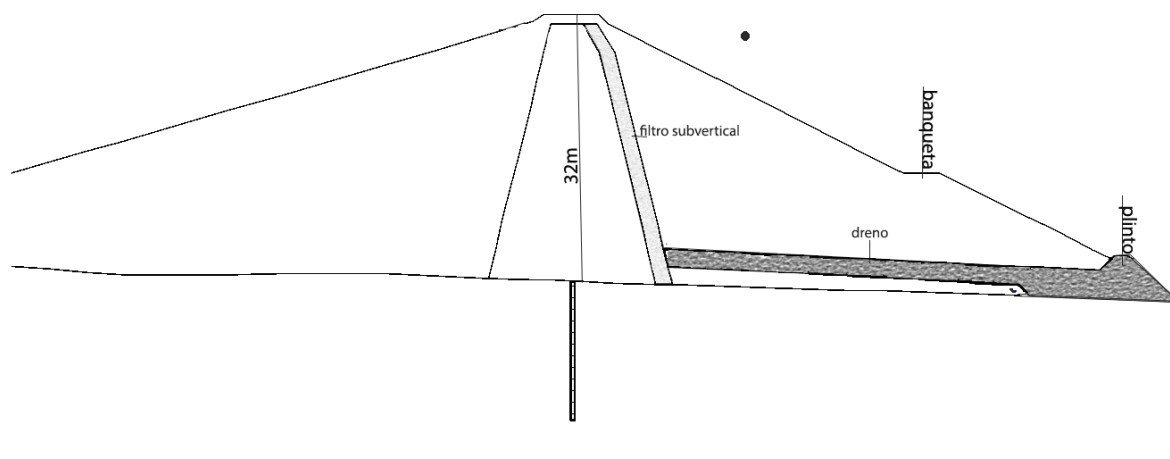


Figura 4.2 - Perfil transversal tipo da barragem de Valtorno-Mourão - sem escala (adaptado de Marcelino, 2005)

Esta barragem está fundada à cota 437 m em material rochoso, essencialmente xistos e granitos, que se distribuem, da margem esquerda para a margem direita, da seguinte maneira: a jusante do plinto encontram-se granitos, e a montante xistos; na margem direita encontram-se, apenas, xistos bastante alterados. No fundo do vale, sobre o substrato rochoso podem encontrar-se aluviões com profundidade máxima de 9 m, constituídos principalmente por uma camada de godo (Marcelino, 2006).

Os materiais que a compõem são provenientes de áreas de empréstimo exploradas na albufeira, dando origem a uma barragem de perfil zonado com núcleo central, composta essencialmente por xistos e granitos alterados (Figura 4.2). O paramento de jusante apresenta uma inclinação de 1:2,2 e o paramento de montante uma inclinação de 1:3,5. O paramento de jusante tem uma banqueta à cota 453 m, com uma largura de 4 m. Para controlar a percolação no corpo da barragem, foi instalado um sistema drenante composto por um filtro sub-vertical, ligado a um tapete drenante (*op. cit.*).

O Nível de Máxima Cheia (NMC) está à cota 468 m e o Nível de Pleno Armazenamento (NPA) fica 1 m abaixo, à cota 467 m. Posteriormente, durante a construção da barragem, procedeu-se ao alteamento da cota do coroamento da barragem, através da construção de um muro em betão com a forma de “L”. Este muro apresenta uma cota máxima de 469,7 m. (Marcelino, 2006)

O controlo da passagem de água através da fundação foi feito através de uma cortina de injeções elaborada no plinto, construído com as escombreyras da limpeza da fundação. O controlo das deformações do aterro é feito apenas pela avaliação dos deslocamentos superficiais, uma vez que, considerando as características da barragem, não existe razão para que este controlo seja mais preciso ou exija um maior nível de monitorização. Para controlo dos deslocamentos superficiais foram instaladas na barragem 13 marcas superficiais, das quais 10 no coroamento – cinco a montante e cinco a jusante, e as três restantes na banqueta a jusante. Foram instalados de forma a manter um espaçamento igual entre marcas instaladas na mesma linha, isto é, na linha de montante no coroamento, linha de jusante no coroamento e linha de jusante na banqueta.

Para controlo dos caudais foram instalados medidores de caudais após a finalização da obra. Estes foram colocados em cotas mais baixas, junto da fundação, com o intuito de medir o caudal drenado pelo tapete drenante. No seu total foram instalados três drenos e um medidor de caudais, instalados no fundo do vale, estando todos ligados ao medidor de caudais.

Relativamente à monitorização dos valores de pressões intersticiais no corpo e fundação da barragem, foram colocados no total 28 piezómetros, dos quais 20 projetados e instalados desde o início da obra e 8 instalados durante/após o tratamento da fundação, estes últimos não serão considerados para a análise feita.

Os perfis com os vários cortes onde estão assinalados os piezómetros e marcas superficiais e o esquema dos medidores de caudais podem ser observados no Anexo I.

Foram ainda instalados alguns piezómetros elétricos com o objetivo de auxiliar na observação das pressões intersticiais nas zonas de contato entre o aterro e a fundação.

Seguidamente, apresenta-se o quadro resumo com as principais especificações dos piezómetros iniciais - retirado do Plano de Observação da barragem de Valtorno-Mourão (Marcelino, 2005).

Tabela 4.1 - Dados técnicos dos piezómetros instalados na barragem de Valtorno-Mourão (retirado de Marcelino, 2005)

| Designação | Local | Critério de posicionamento | Cota aproximada | Comprimento da câmara do piezómetro (m) |
|------------|-----------|--|--|---|
| PH1/3 | Corte 3-3 | a 4,74 m do eixo para montante, com o encabeçamento à cota 468,5 | 432-435 | 3 |
| PH2/3 | | | 446 | 0,3 |
| PH3/3 | | | 455 | 0,3 |
| PH4/3 | | a 4 m do eixo para jusante, com o encabeçamento à cota 468,5 | 432-435 | 3 |
| PH5/3 | | | 446 | 0,3 |
| PH6/3 | | | 455 | 0,3 |
| PH7/3 | | Na banquetta de jusante acima da caleira | 432-435 | 3 |
| PH8/3 | | | 441,5 (1,5 m acima do tapete drenante) | 0,3 |
| PH1/4 | Corte 4-4 | a 4,74 m do eixo para montante, com o encabeçamento à cota 468,5 | 432-435 | 3 |
| PH2/4 | | | 446 | 0,3 |
| PH3/4 | | | 455 | 0,3 |
| PH4/4 | | a 4 m do eixo para jusante, com o encabeçamento à cota 468,5 | 432-435 | 3 |
| PH5/4 | | | 446 | 0,3 |
| PH6/4 | | | 455 | 0,3 |
| PH7/4 | | Na banquetta de jusante acima da caleira | 432-435 | 3 |
| PH8/4 | | | 441,5 (1,5 m acima do tapete drenante) | 0,3 |
| PH1/5 | Corte 5-5 | a 4,74 m do eixo para montante, com o encabeçamento à cota 468,5 | 439-442 | 3 |
| PH2/5 | | | 455 | 0,3 |
| PH3/5 | | a 4,74 m do eixo para montante, com o encabeçamento à cota 468,5 | 439-442 | 3 |
| PH4/5 | | | 455 | 0,3 |

Quando a barragem de Valtorno-Mourão, se encontrava na fase de primeiro enchimento - Maio de 2006, verificou-se que a barragem, do ponto de vista hidráulico, não estava a apresentar o comportamento esperado. Os registos de caudais ultrapassavam os valores esperados - definidos no plano de observação do LNEC, e os piezómetros a jusante registavam níveis de água anormais para o tipo de estrutura construída. Foi então decidido interromper a fase do primeiro enchimento, bem como realizar um esvaziamento controlado da albufeira, de maneira a evitar o aumento dos problemas na fundação (Marcelino, 2008).

Após esta paragem forçada foram reavaliados todos os órgãos constituintes da barragem, com principal foco nos tratamentos da fundação. Concluiu-se que a fundação não apresentava condições de segurança adequadas para o funcionamento normal da barragem e decidiu-se realizar um reforço no tratamento da fundação, através da realização de novas cortinas de injeção. Esta reavaliação demorou cerca de um ano tendo-se decidido avançar com os trabalhos em Agosto de 2007. Em outubro de 2007 já os trabalhos prosseguiram com resultados adequados. O tratamento da fundação terminou em Janeiro de 2008 quando se procedeu novamente ao enchimento da albufeira (*op. cit.*).

O processo de tratamento de uma fundação é bastante condicionado pelas respostas que a fundação vai dando ao longo do seu tratamento. Por essa razão, o tratamento foi efetuado segundo o método do *split-spacing* e projetado em várias fases, sendo que só se realiza a fase seguinte se a anterior ainda não tiver dado os resultados pretendidos. Ou seja, primeiro, executam-se os “furos primários” com um espaçamento pré-definido. Caso estes não resultem no melhoramento pretendido, avaliado através do ensaio de absorção de água em furos situados a meia distância dos anteriores, prossegue-se para a segunda fase, onde são executados os “furos secundários”, que serão feitos no furo executado para o ensaio de absorção. O processo de furação e respetiva injeção de calda de cimento vai-se realizando, fase a fase, até se obterem os resultados pretendidos. A avaliação dos resultados é feita com base nos seguintes parâmetros (*op. cit.*):

- Consumo de calda de cimento;
- Pressão da injeção;
- Resultados do tratamento, avaliados através de ensaios de absorção e de injeção feitos após o tratamento.

A escolha desta barragem deve-se ao facto de ser uma barragem recente, mas com um número significativo de dados de instrumentação. Devido aos problemas que apresentou na fundação esta foi acompanhada minuciosamente por parte do LNEC e por isso é também do interesse do mesmo conseguir controlar e prever os comportamentos futuros das grandezas que mais influenciam a segurança da barragem.

4.2 Aplicação das Redes Neuronais Artificiais (RNA) aos registos de observação

Como referido em 3.1 a RNA Multi Layer Perceptron Backpropagation, para cada um dos conjuntos de dados correspondente a cada uma das RNA construídas, selecionou um conjunto de treino – *training set* – e um conjunto de teste – *test set*. Para cada uma das redes o *training wizard* teve a “liberdade” de fazer variar os parâmetros que controlam o treino. Foi-lhe dado:

- um intervalo onde podia variar a percentagem dos dados que utilizava como *training set* e como *test set*;
- um intervalo para poder variar o *learning rate* – LR;
- um intervalo onde podia fazer variar o valor do *momentum term* – MT;
- um intervalo onde podia fazer variar o número de *hidden neurons* – neurónios escondidos;
- e foi-lhe definido o número máximo de iterações, o erro máximo

Na primeira linha da rede são inseridos os *inputs*. Na segunda linha encontram-se o/s *hidden layers* que são escolhidos pelo programa, sendo apenas limitado o valor mínimo e o valor máximo de *hidden neurons* que podem ser utilizados pela RNA tal como já foi referido anteriormente. Por último na terceira e última linha - caso o programa considere apenas uma camada de *hidden neurons* – encontram-se os valores de *Desired Output* e será também nesta camada que a rede armazena os valores de *Output* para que, à medida que a rede vai sendo treinada, os valores possam ir sendo comparados e o erro possa ir sendo melhorado.

Os gráficos dos valores medidos *versus* valores calculados e os gráficos de dispersão que avaliam a dispersão e qualidade do modelo podem ser encontrados na sua totalidade nos Anexos III e IV, respetivamente.

4.2.1 Valores de pressão de água

Depois de algumas tentativas falhadas com o conjunto total de dados, começou-se a perceber que estes não poderiam ser trabalhados como um todo, mas que era necessário separá-los por localização geográfica. Separam-se então os dados dos piezómetros instalados no aterro dos dos piezómetros instalados na fundação. Novamente executaram-se testes com redes neuronais criadas para estes dois conjuntos de piezómetros e mais uma vez o erro quadrático médio – EQM – obtido não foi satisfatório. Por essa razão decidiu-se separar os dados por localização na barragem, fazendo uma subdivisão da anteriormente feita, ficando os dados reorganizados nos seguintes grupos:

- Fundação Coroamento Jusante – FCJ;
- Fundação Coroamento Montante – FCM;
- Fundação Banqueta – FB;
- Aterro Coroamento Jusante – ATJ;
- Aterro Coroamento Montante – ACM;
- Aterro Banqueta – AB.

Os testes feitos com estes novos conjuntos de dados já apresentaram um EQM mais satisfatório, principalmente nos piezómetros instalados a montante mas, mesmo assim, o erro para os piezómetros a jusante ainda era demasiado elevado para o objetivo pretendido. Por exemplo para o piezómetro PH 6/4, instalado a partir do coroamento na zona do aterro a jusante, obtiveram-se os resultados representados graficamente na Figura 4.3. Como é possível observar os resultados não foram os melhores, apenas havendo uma adequação da modelação para os valores medidos na fase antes do tratamento, até cerca de finais de 2007, e para os valores medidos mais recentemente após o efeito do tratamento, de Junho de 2012 em diante. O valor de EQM para os valores medidos *versus* valores calculados do piezómetro PH 6/4 é: 0.0654, que para o caso não satisfaz o objetivo.

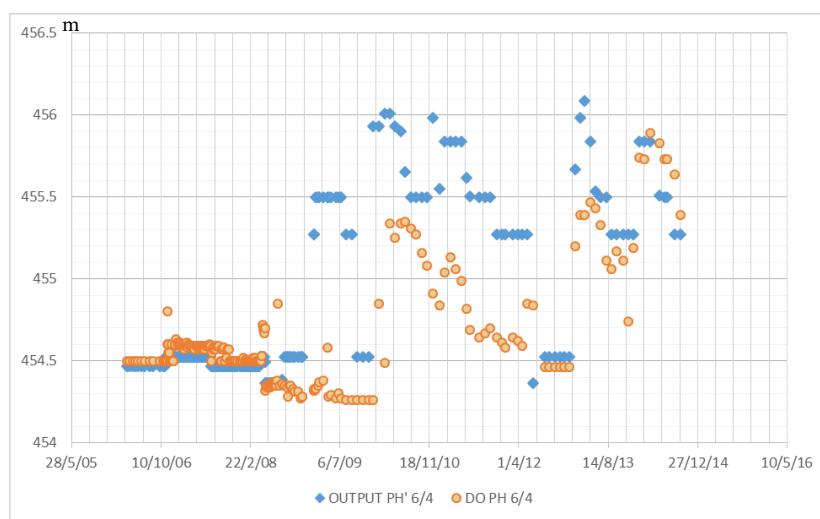


Figura 4.3 - *Output versus Desired Output* - DO para o piezómetro PH 6/4 – após subdivisão por localização

Assim, considerando que a barragem foi submetida a um tratamento da fundação passados cerca de um ano e meio após o início do seu funcionamento, voltou-se a subdividir os trechos anteriores, mas apenas para os conjuntos de dados de piezómetros localizados a jusante da barragem e para aqueles que estão instalados na banquetta. Criaram-se então novos subconjuntos de dados, ficando estes organizados nos seguintes grupos:

- FCJ até final do tratamento;
- FCJ após o tratamento;
- ACJ até final do tratamento;
- ACJ após o tratamento;

- FB até final do tratamento;
- FB após o tratamento;
- AB até final do tratamento;
- AB após o tratamento.

Finalmente, após todas as alterações descritas anteriormente, foi possível obter resultados bastante satisfatórios para todos os piezómetros instalados desde o início do funcionamento da barragem. É de referir que, para cada um dos grupos referidos anteriormente, foi criada uma RNA diferente. Cada uma das redes foi criada com base nos dados que iam ser testados.

4.2.1.1 Resultados

Atendendo à subdivisão dos dados piezométricos efetuados pretende-se, nesta secção, efetuar um estudo estatístico para avaliar a consistência da previsão feita pelos modelos de RNA. Apresenta-se em primeiro lugar, o tabela resumo dos erros quadráticos médios dos valores calculados *versus* os valores medidos – Tabela 4.2. Encontram-se evidenciados nesta tabela o melhor e o pior EQM e o respetivo piezómetro. Em segundo lugar, apresentam-se o pior e o melhor resultados globais referentes aos valores de pressão de água.

Tabela 4.2 - EQM dos valores calculados *versus* valores medidos para os dados dos piezómetros

| Piezómetro | Localização | EQM |
|------------|-----------------------------|----------|
| PH 1/3 | FCM | 0.001717 |
| PH 1/4 | | 0.004052 |
| PH 1/5 | | 0.007183 |
| PH 3/4 | ACM | 0.007075 |
| PH 2/4 | | 0.000688 |
| PH 3/3 | | 0.007532 |
| PH 2/3 | | 0.015609 |
| PH 3/5 | | 0.006437 |
| PH 4/4 | FCJ até final do tratamento | 0.011880 |
| PH 4/3 | | 0.003080 |
| PH 4/5 | | 0.002454 |
| PH 4/4 | FCJ após o tratamento | 0.016562 |
| PH 4/3 | | 0.000935 |
| PH 4/5 | | 0.015333 |
| PH 6/4 | ACJ até final do tratamento | 0.000875 |
| PH 5/4 | | 0.038542 |
| PH 5/3 | | 0.030158 |
| PH 6/4 | ACJ após o tratamento | 0.013785 |
| PH 5/4 | | 0.006247 |
| PH 5/3 | | 0.002582 |
| PH 7/4 | FB até final do tratamento | 0.013907 |
| PH 7/3 | | 0.027699 |
| PH 7/4 | FB após o tratamento | 0.005464 |
| PH 7/3 | | 0.001232 |
| PH 8/4 | AB até final do tratamento | 0.026159 |
| PH 8/3 | | 0.009871 |
| PH 8/4 | AB após o tratamento | 0.004919 |
| PH 8/3 | | 0.071597 |

Pior resultado – PH 8/3 – AB após o tratamento

Como se pode observar nas Figuras 4.4 e 4.5 para este piezómetro, instalado no aterro na zona da banquetta, o modelo da RNA não conseguiu calcular valores que aproximassem tão bem os valores medidos. Apesar disso, pode verificar-se que a aproximação feita é razoavelmente significativa para parte dos dados medidos. Como se pode observar pelo valor do EQM obtido, a RNA utilizada para previsão dos valores não conseguiu adaptar-se totalmente aos valores medidos, havendo por isso alguns valores calculados que não se enquadram em qualquer previsão.

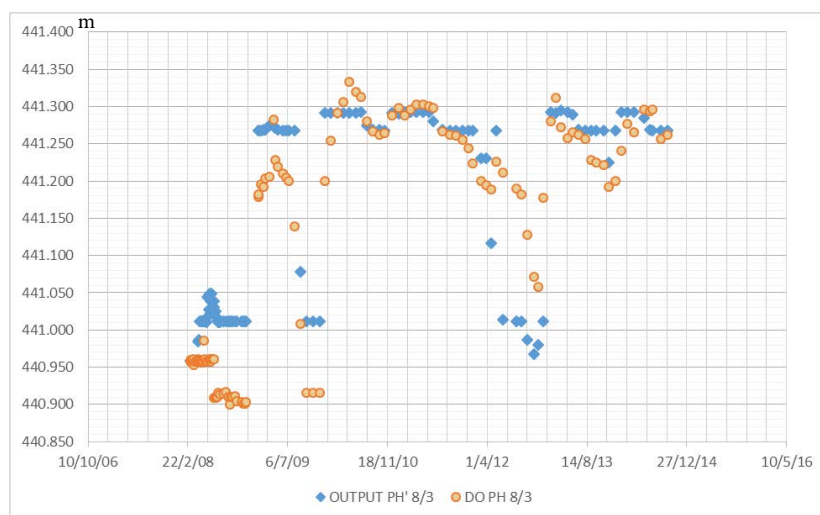


Figura 4.4 - *Output versus Desired Output* - DO para o piezómetro PH 8/3 – AB após o tratamento

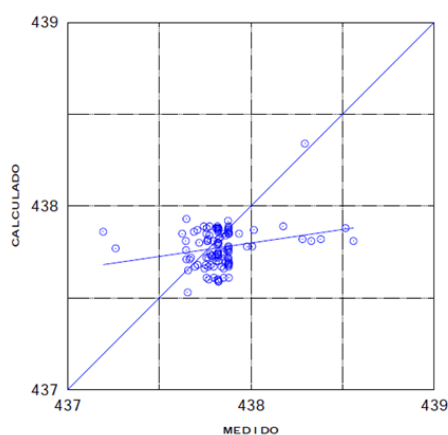


Figura 4.5 – Comparação entre valores medidos e valores calculados para o piezómetro PH 8/3 – AB após o tratamento

Melhor resultado – PH 2/4 – ACM

Como se pode observar no gráfico da Figura 4.6, através dos valores calculados com o modelo criado pela RNA para os piezómetros do aterro a montante conseguiu-se, para este piezómetro, acompanhar, de uma maneira geral, toda a curva dos valores medidos. O gráfico da dispersão – Figura 4.7, dos valores medidos *versus* valores calculados com a respetiva linha de tendência e a reta dos 45°, correspondente à situação de igualdade perfeita, comprova a qualidade do modelo de previsão criado pela RNA.



Figura 4.6 - *Output versus Desired Output* - DO para o piezómetro PH 2/4 – ACM

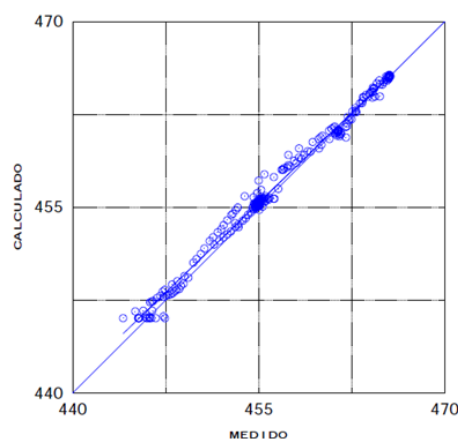


Figura 4.7 - Comparação entre valores medidos e valores calculados para o piezómetro PH 2/4 – ACM

Este foi o resultado obtido pelos vários modelos de RNA criados para a previsão do comportamento das pressões de água na barragem de Valtorno-Mourão. Como era esperado, o resultado mais significativo foi encontrado para um dos piezómetros instalados a montante. É normal que isto aconteça pois estes piezómetros apresentam pressões de água que vão, de uma forma direta, variar consoante a variação do NAA. Como o *input* para a criação do modelo é o NAA, torna-se fácil para a RNA construir um modelo que consiga prever, com facilidade, quais os valores medidos ou quais os valores que poderão vir a ser medidos.

Através da inserção de valores desconhecidos do NAA no conjunto de dado da rede tentou-se obter uma previsão dos próximos valores a medir para o ano de 2015 no piezómetro PH 2/4. A Tabela 4.3 apresenta estas previsões.

Tabela 4.3 – Previsão dos valores de pressão de água registados pelo piezómetro PH 2/4 para o ano de 2015

| Pressões de água | Nível de água da albufeira (valores iterados para o ano de 2015) | Valor previsto (m) |
|-------------------------|--|-----------------------|
| 12/01/2015 | 463.0 | 462.2 |
| 30/01/2015 | 463.8 | 462.7 |
| 17/02/2015 | 466.1 | 464.5 |
| 07/03/2015 | 465.8 | 464.2 |
| 25/03/2015 | 465.5 | 463.9 |
| 12/04/2015 | 463.9 | 462.8 |
| 30/04/2015 | 463.7 | 462.6 |
| 18/05/2015 | 463.3 | 462.4 |
| 05/06/2015 | 463.1 | 462.3 |
| 23/06/2015 | 463.1 | 462.3 |
| 11/07/2015 | 463.2 | 462.4 |
| 29/07/2015 | 463.0 | 462.2 |
| 16/08/2015 | 462.8 | 462.1 |
| 03/09/2015 | 462.5 | 461.9 |
| 21/09/2015 | 462.4 | 461.8 |
| 09/10/2015 | 462.6 | 461.9 |
| 27/10/2015 | 462.8 | 462.1 |
| 14/11/2015 | 463.1 | 462.3 |
| 02/12/2015 | 463.4 | 462.5 |
| 20/12/2015 | 464.0 | 462.9 |

4.2.2 Valores de caudais

Da mesma maneira que os valores de pressão de água dependem diretamente do NAA, para o estudo dos valores de caudais o fator que está diretamente relacionado com a sua variação é, também, o NAA. Por essa razão para a criação da rede os valores de *input* são os NAA e os valores de *Output*, tal como é pretendido, são os caudais. Sendo que o sistema de medição de caudais é constituído, como referido, por 3 drenos e um medidor de caudais foram feitos os somatórios do valor total de caudal por dia e são esses valores que são considerados no treino da rede.

4.2.2.1 Resultados

Devido ao facto da barragem de Valtorno - Mourão ter sido sujeita a um esvaziamento rápido e tratamento da fundação considerou-se que, para o estudo do comportamento dos caudais, só faria sentido ter em conta os valores medidos após o tratamento da fundação. Desta maneira, os dados utilizados para esta RNA começam apenas com os que foram medidos em Janeiro de 2008, altura em que o tratamento da fundação já tinha sido finalizado e a barragem começava a funcionar normalmente.

Para este estudo conseguiu-se criar uma só RNA que foi treinada de forma a prever os valores. Este modelo obteve um EQM de 0.001659. O resultado é significativo e os gráficos do valor calculado *versus* valor medido – Figura 4.8 - e da dispersão com respetiva linha de tendência e reta dos 45° graus – Figura 4.9 - comprovam esta situação. É de esperar que este modelo possa fazer uma previsão adequada dos valores futuros de caudais através de novos NAA inseridos no modelo.

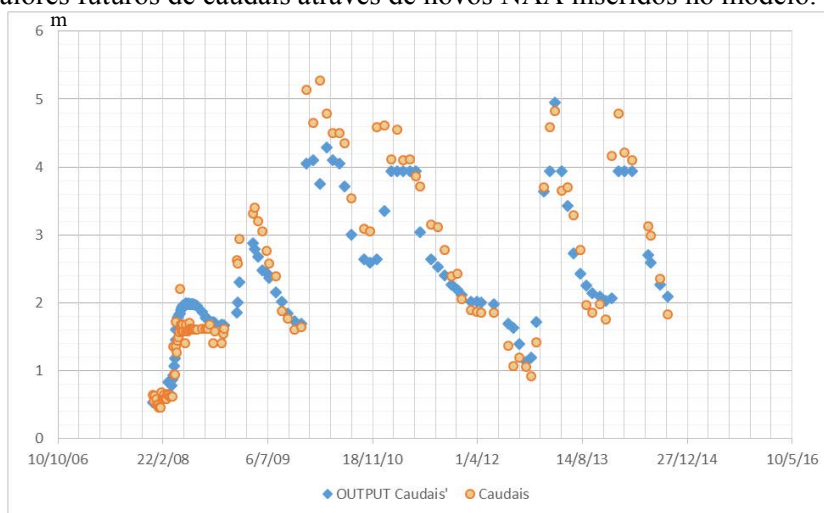


Figura 4.8 - *Output versus Desired Output* - DO para os caudais medidos após o tratamento da fundação

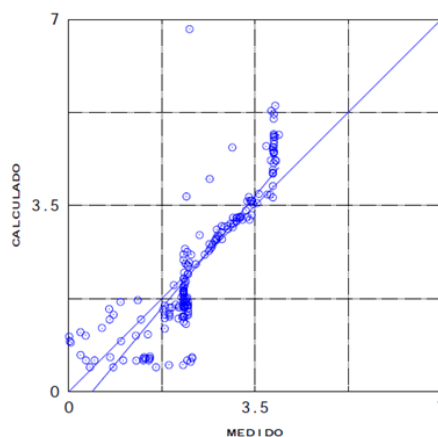


Figura 4.9 - Comparação entre valores medidos e valores calculados para os caudais medidos após o tratamento da fundação

Tal como foi feito para os valores piezométricos, foram inseridos os mesmos valores desconhecidos de NAA no conjunto de dados da rede criada para a modelação dos caudais. A previsão obtida pode ser observada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Previsão dos valores de caudais totais registados pelo medidor de caudais para o ano de 2015

| Caudais | Nível de água da albufeira (valores iterados para o ano de 2015) | Valor previsto (em l/s) |
|----------------|---|----------------------------|
| 12/01/2015 | 463.0 | 2.45 |
| 30/01/2015 | 463.8 | 2.51 |
| 17/02/2015 | 466.1 | 2.88 |
| 07/03/2015 | 465.8 | 2.82 |
| 25/03/2015 | 465.5 | 2.75 |
| 12/04/2015 | 463.9 | 2.52 |
| 30/04/2015 | 463.7 | 2.49 |
| 18/05/2015 | 463.3 | 2.47 |
| 05/06/2015 | 463.1 | 2.45 |
| 23/06/2015 | 463.1 | 2.45 |
| 11/07/2015 | 463.2 | 2.46 |
| 29/07/2015 | 463.0 | 2.45 |
| 16/08/2015 | 462.8 | 2.44 |
| 03/09/2015 | 462.5 | 2.43 |
| 21/09/2015 | 462.4 | 2.43 |
| 09/10/2015 | 462.6 | 2.43 |
| 27/10/2015 | 462.8 | 2.44 |
| 14/11/2015 | 463.1 | 2.45 |
| 02/12/2015 | 463.4 | 2.47 |
| 20/12/2015 | 464.0 | 2.53 |

4.2.3 Valores de deslocamentos superficiais

Nesta situação utilizou-se os valores dos deslocamentos superficiais medidos pelas 13 marcas superficiais instaladas na barragem. Foi obtido, para cada uma delas, um valor de EQM (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - EQM dos valores calculados *versus* valores medidos para os dados das marcas superficiais

| Marca | Localização | EQM |
|--------------|---------------------|------------|
| Ms1/m | Coroamento Montante | 0.00005636 |
| Ms2/m | | 0.00002040 |
| Ms3/m | | 0.00003464 |
| Ms4/m | | 0.00002838 |
| Ms5/m | | 0.00004382 |
| Ms1/j | Coroamento Jusante | 0.00001700 |
| Ms2/j | | 0.00005644 |
| Ms3/j | | 0.00002308 |
| Ms4/j | | 0.00002523 |
| Ms5/j | | 0.00000949 |
| Ms2/b | Banqueta | 0.00006215 |
| Ms3/b | | 0.00002223 |
| Ms4/b | | 0.00001054 |

Os deslocamentos superficiais dependem de vários fatores. Para a criação da RNA foram utilizados como *inputs* o tempo, em dias, e as coordenadas de cada marca, bem como os pontos de referência do corpo da barragem onde os assentamentos são considerados nulos. Esta malha foi definida de forma a que se possa prever o comportamento em qualquer ponto que se encontre dentro da malha definida. Como se pode observar na Figura 4.10, o referencial e malha adotados foram feitos com base na escala da imagem, retirada do Plano de Observação da barragem de Valtorno-Mourão (João Marcelino, 2005), de maneira a que as linhas do desenho pudessem facilitar as medições das coordenadas.

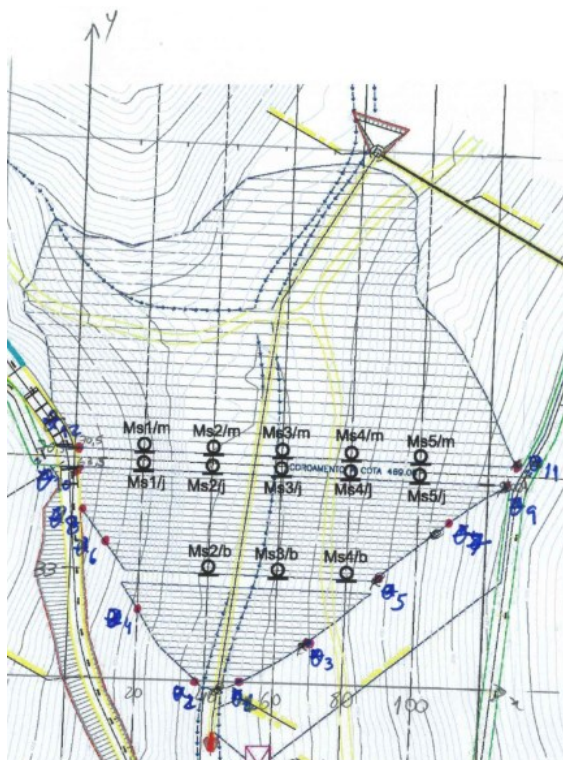


Figura 4.10 - Planta da barragem de Valtorno-Mourão com o referencial adotado, as marcas superficiais e os pontos de referência – sem escala (adaptado de LNEC, 2015)

Tabela 4.6 – Coordenadas dos pontos de referência e marcas superficiais com base no referencial adotado

| Referência | x | y | Marca | x | y |
|------------|--------|-------|-------|-------|------|
| 01 | 50 | 0 | Ms1/j | 20.0 | 63.5 |
| 02 | 37.86 | 0 | Ms1/m | 20.0 | 70.5 |
| 03 | 70 | 12.14 | Ms2/b | 40.0 | 33.0 |
| 04 | 20 | 20 | Ms2/j | 40.0 | 63.5 |
| 05 | 90 | 31.43 | Ms2/m | 40.0 | 70.5 |
| 06 | 10 | 40 | Ms3/b | 60.0 | 33.0 |
| 07 | 110 | 48.57 | Ms3/j | 60.0 | 63.5 |
| 08 | 2.86 | 50 | Ms3/m | 60.0 | 70.5 |
| 09 | 127.14 | 59.29 | Ms4/b | 80.0 | 33.0 |
| 010 | 0 | 60 | Ms4/j | 80.0 | 63.5 |
| 011 | 128.57 | 64.29 | Ms4/m | 80.0 | 70.5 |
| 012 | 0 | 65.71 | Ms5/j | 100.0 | 63.5 |
| | | | Ms5/m | 100.0 | 70.5 |

Como se percebe pela tabela dos EQM (Tabela 4.5) os resultados dos modelos criados para a previsão do comportamento relativamente aos deslocamentos superficiais foram bastante satisfatórios. Por essa razão apresenta-se apenas um exemplo com os respectivos gráficos do valor calculado *versus* o valor medido – Figura 4.11 - e o gráfico da dispersão – Figura 4.12.

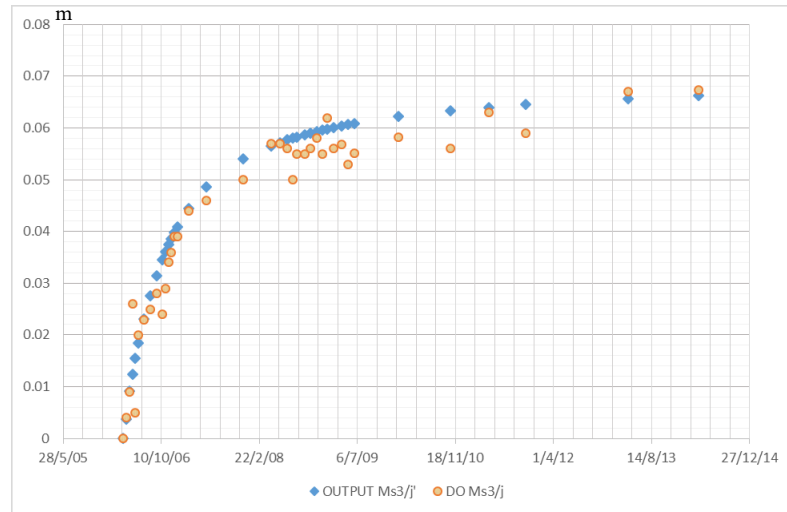


Figura 4.11 - *Output versus Desired Output* - DO para a marca superficial: Ms3/j

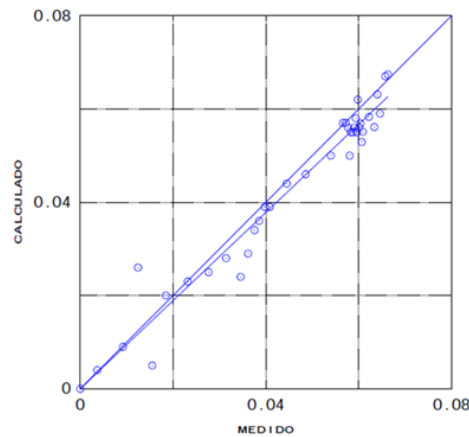


Figura 4.12 - Comparação entre valores medidos e valores calculados para a marca superficiais Ms3/j

Através da inserção de novas datas (em tempo, dias) e novas coordenadas, que no seu conjunto formam uma malha que cobre todo o paramento jusante, fez-se a previsão para três novas datas:

- 15 de Janeiro de 2015;
- 13 de Fevereiro de 2015;
- 01 de Março de 2015.

Com um conjunto total de 121 pontos diferentes por data. A Figura 4.13 ilustra o resultado para a última data através de linhas de contorno obtidas por interpolação, com base nos valores de assentamentos previstos para cada ponto da malha definida.

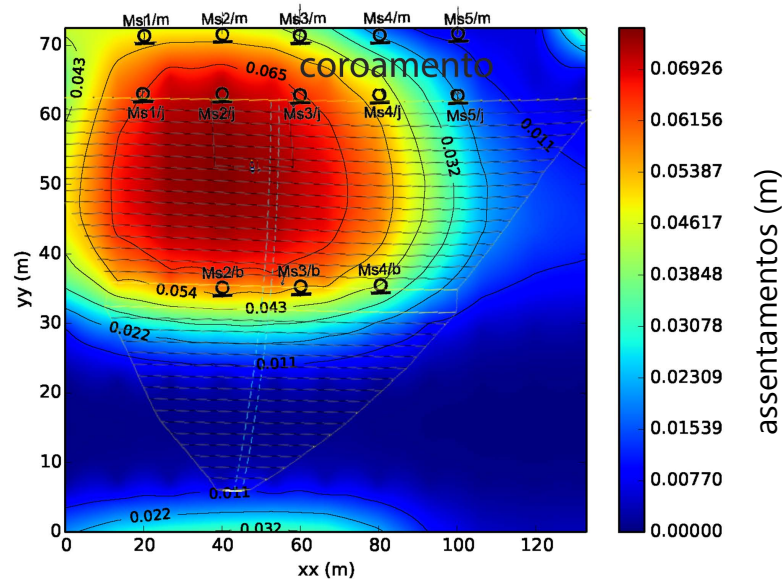


Figura 4.15 - Contour plot dos resultados das previsões dos assentamentos para 01 de Março de 2015

Tal como era expectável, não se detetou qualquer variação nos assentamentos durante esses meses, não se apresentando por isso os restantes dois gráficos com os respetivos resultados. Refira-se ainda que, aparentemente, a RNA “percebeu” o comportamento dos assentamentos e conseguiu prever, razoavelmente, os valores futuros. Observou-se ainda que os assentamentos se localizam tendencialmente, mais do lado da margem direita do corpo da barragem, o que é normal, devido ao facto desse encontro apresentar uma inclinação mais elevada que o outro.

5 Considerações finais

5.1 Síntese

As barragens de aterro são estruturas que, devido à sua complexidade de conceção e risco potencial associado, necessitam de um adequado controlo da segurança e comportamento, sendo por isso relevante a sua observação. Com o intuito de prever ou controlar os comportamentos destas barragens, foram desenvolvidos modelos de redes neuronais artificiais - RNA, em particular as do tipo *Multi Layer Perceptron Backpropagation* - MLPBP, para analisar as principais grandezas usadas no controlo do comportamento e, consequentemente, no controlo da segurança.

No Capítulo 2 apresenta-se a classificação de vários tipos de barragens de aterro, ilustrando-se alguns exemplos. De seguida abordaram-se as metodologias para a observação destas barragens: monitorização e inspeção visual; com especial ênfase nas grandezas que mais se relacionam com o comportamento destas estruturas, nomeadamente os deslocamentos superficiais, as pressões de água, os níveis de água de albufeira e os caudais. Refiram-se ainda modelos de previsão do comportamento utilizados para o estudo destas estruturas.

O Capítulo 3 apresenta, numa primeira parte, detalhes acerca da escolha da RNA utilizada e dos *software* ou linguagens de programação utilizados para o estudo efetuado. Detalha-se o *Neuroph Studio* como o programa escolhido para a análise proposta, o seu funcionamento e executaram-se alguns testes que visaram confirmar a sua aplicabilidade. No seguimento desta primeira parte são apresentados alguns conceitos gerais das RNA, explicitando o funcionamento da RNA MLPBP, uma vez que foi esta a utilizada no caso de estudo. Foram explicados os processos de implementação, funcionamento e obtenção de resultados deste tipo de RNA. Uma vez que estas redes apenas servem de ferramenta para a criação dos modelos de previsão, na última parte deste capítulo descreve-se o processo de criação e organização dos dados da observação de barragens de aterro que constituem toda a informação das que foram avaliadas ou estudadas pelo LNEC, com o intuito de facilitar a sua utilização nas RNA e potenciar o seu uso ou consulta em trabalhos futuros.

Após a introdução dos conceitos necessários para a justificação do tema e a concretização dos objetivos propostos, enquadrou-se no Capítulo 4, numa primeira secção, a barragem selecionada para o caso de estudo. A barragem de Valtorno-Mourão foi descrita de forma sucinta e posteriormente foram modeladas as várias grandezas selecionadas para o estudo, já apresentadas no Capítulo 2. Consideraram-se como *inputs* das várias RNA criadas: o NAA para o estudo das pressões de água e dos caudais; o tempo (em dias) e as coordenadas x e y de cada marca, de um referencial proposto, para avaliar os deslocamentos superficiais. Como *Outputs* para cada situação descrita anteriormente foram considerados respetivamente: os valores de pressão de água, os caudais medidos e os valores de deslocamentos superficiais (assentamentos). Depois das redes terem sido treinadas, realizou-se uma comparação entre os valores calculados e os valores medidos e fez-se uma avaliação estatística dos resultados obtidos, através dos gráficos de dispersão dos valores calculados *versus* valores medidos.

5.2 Discussão e análise dos resultados

Com o intuito de detetar erros no modelo ou erros resultantes de medições erradas ou defeitos no equipamento, a análise dos resultados foi feita com base na comparação entre os resultados das previsões *versus* as medições. Começou por se observar os gráficos dos valores calculados *versus* os dos valores medidos. Neste processo detetou-se, em cada um deles, zonas onde o modelo não se conseguiu adaptar de maneira a acompanhar os valores medidos. Registou-se que tal tipo de situações se verificam quando:

- As medições apresentam erros; Tais erros podem ser resultantes de falhas nos equipamentos ou falhas durante as medições;

- A variação dos valores apresenta uma descontinuidade; não obstante este tipo de modelos se conseguir adaptar facilmente a dados com muitas variações e “ruído”, uma descontinuidade torna mais difícil para a RNA acompanhar uma variação anómala àquilo que seria o comportamento esperado;
- A RNA tenha sido sobre ou subtreinada; ao sobretreinar a RNA, esta pode ficar perto da saturação da resposta dos neurónios, isto é, a RNA já não se conseguirá adaptar a novos comportamentos, procedendo da mesma forma para todo o tipo de dados inseridos na rede; por outro lado, se a RNA tiver tido um treino insuficiente, não terá conseguido adaptar-se à variação dos dados e ao seu comportamento para fazer previsões corretas para os dados inseridos;
- Os valores medidos têm um comportamento diferente do esperado para o local onde estão instalados; em geral, esta situação é provocada por problemas na barragem;
- Os piezómetros instalados acima do tapete drenante de jusante registam valores de pressão de água; numa situação normal, os piezómetros ali instalados, não devem registar qualquer pressão de água, assim, em rigor, estes piezómetros não necessitariam de ser incluídos nos modelos de RNA e deveriam funcionar como um simples sistema de *On/Off*. Quando estes piezómetros registam valores de pressão de água, poderá existir um problema grave na barragem, dado que tal situação corresponde à saturação do tapete drenante e, portanto, à sua insuficiência. Como não deve existir variação da pressão de água pode afirmar-se que, normalmente, não há relação entre o NAA e a variação da pressão de água nestes piezómetros, por isso é expectável que os resultados dos modelos não sejam adequados;
- A barragem sofreu tratamentos da fundação; neste caso, principalmente para os grupos de piezómetros que não foram separados – ACM e FCM, detetaram-se algumas zonas de adaptação deficiente do modelo, resultantes da provável variação qualitativa da resposta da fundação.

Relativamente aos resultados gerais são de relevar as seguintes situações:

Piezómetros a jusante

Os piezómetros instalados no aterro banquetta (AB) revelam claramente, para os valores medidos antes do tratamento, a existência de um problema de comportamento da barragem. O aumento repentino da pressão de água é um possível indicador da existência de fendas que tendem a abrir com o acréscimo da pressão. Como se observa no gráfico do PH 8/4 – Figura 5.1, o valor da pressão de água aumenta durante cerca de 7 meses até o processo de tratamento da fundação começar a ser efetuado.

Observa-se ainda que a RNA não conseguiu criar um modelo que acompanhasse esta variação anómala. Esta situação de aumento repentino da pressão de água verifica-se para todos os piezómetros a jusante, tanto nos instalados na banquetta (AB e FB) como nos instalados a jusante (FCJ e ACJ). É ainda relevante referir que, para os piezómetros da fundação a jusante (FCJ), o comportamento é mais homogéneo no conjunto dos piezómetros, o que permitiu à RNA a criação de um modelo que se adapta de uma forma bastante razoável ao comportamento observado. Como se pode ver pelo gráfico do piezómetro PH 4/5 – Figura 5.2, o modelo de previsão criado pela RNA acompanha claramente os valores medidos.

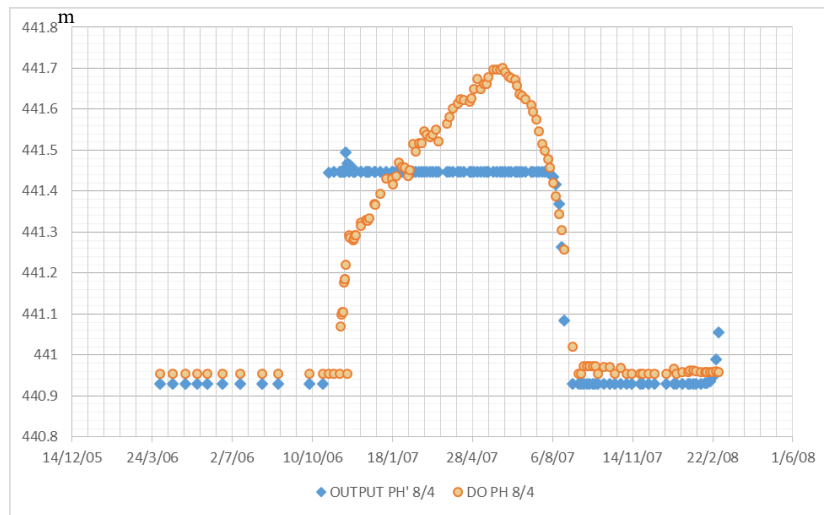


Figura 5.1 – Exemplo - *Output versus Desired Output* - DO para o piezômetro PH 8/4 – AB até ao tratamento

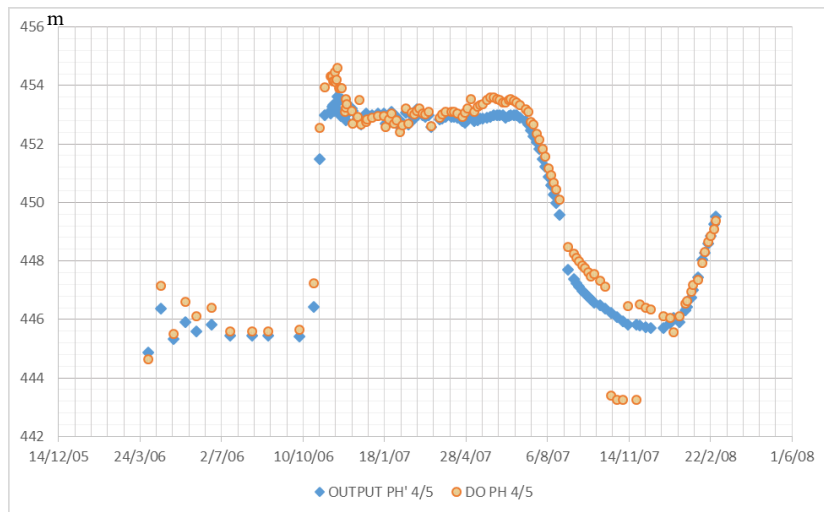


Figura 5.2 – Exemplo - *Output versus Desired Output* - DO para o piezômetro PH 4/5 – ACJ até ao tratamento

A jusante, os únicos piezômetros que apresentam um comportamento compatível com a variação do NAA são os instalados na fundação a partir do coroamento (FCJ). Considerando apenas os valores após o tratamento, verificou-se que há uma boa resposta da RNA para a criação de um modelo que se adapte ao comportamento daquele piezômetro. Como se pode verificar pelo gráfico do piezômetro PH 4/3 - Figura 5.3, a RNA consegue acompanhar de uma forma aceitável os valores medidos.

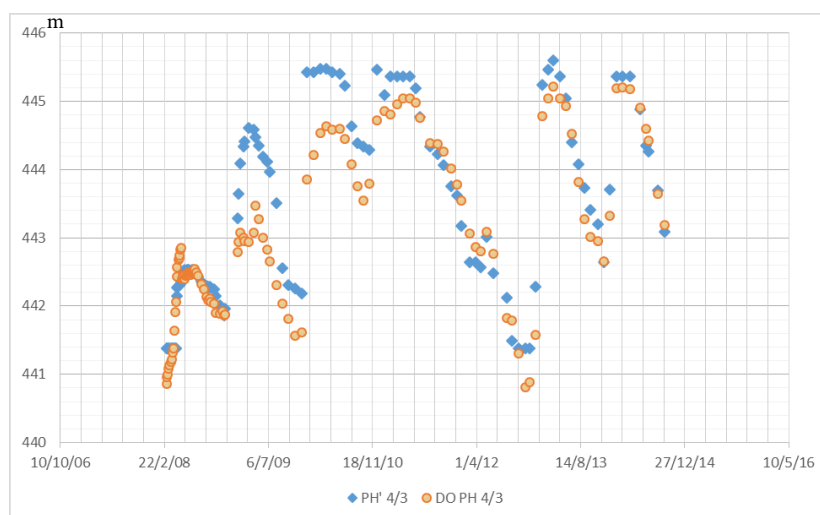


Figura 5.3 – Exemplo - *Output versus Desired Output* - DO para o piezómetro PH 4/3 – ACJ após o tratamento

Piezómetros a montante

Relativamente a estes piezómetros é importante referir que, tal como já foi dito anteriormente, se detetaram algumas anomalias no modelo de previsão criado pela RNA que, muito provavelmente, podem ser atribuídas ao facto de terem ocorrido os problemas na fundação já referidos e que implicaram o seu ulterior tratamento. Como se pode observar no gráfico do piezómetro PH 1/5 – Figura 5.4, o modelo conseguiu acompanhar razoavelmente o comportamento das pressões de água do respetivo piezómetro, instalado na fundação a montante. Mesmo com a variação repentina da pressão de água, resultante do esvaziamento forçado da albufeira para a realização do tratamento da fundação, a RNA conseguiu acompanhar o processo e “perceber” que essa variação era comum a todos os piezómetros da fundação a montante.

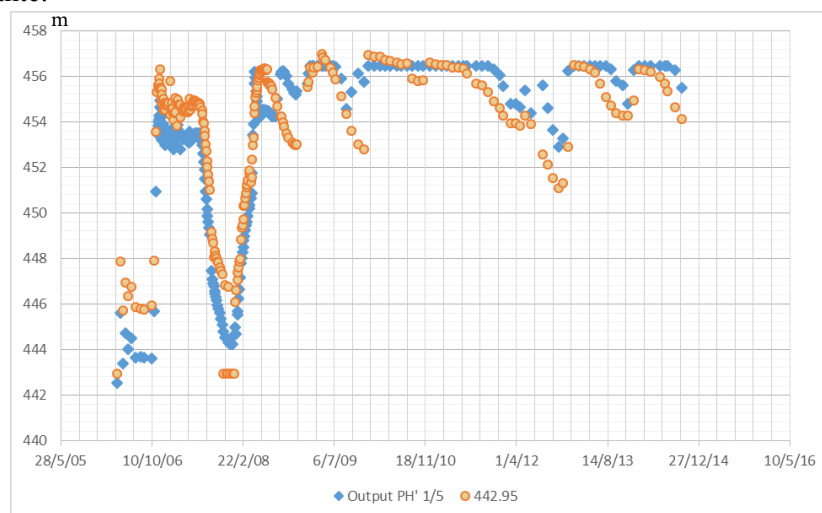


Figura 5.4 – Exemplo - *Output versus Desired Output* - DO para o piezómetro PH 1/5 – FCM

Marcas superficiais

As marcas superficiais apresentam valores pontuais que se encontram fora daquilo que seria o esperado no desenvolvimento dos assentamentos ao longo do tempo. Constatou-se a existência de valores mais elevados, ou mais baixos que os restantes, em certas observações, provavelmente resultantes de leituras erradas. Apesar disso estes valores acabam por ser insignificantes, pois o erro é da ordem do milímetro ou da décima de milímetro o que, tal como se observa pelos erros quadráticos médios, dão origem a erros muito baixos. Em algumas situações, os erros provocam distorções no modelo criado pela RNA, mas como se trata de erros baixos, a sua influência na previsão é insignificante.

Caudais

Relativamente aos caudais, tal como seria de esperar, o modelo criado pela RNA acompanha perfeitamente a variação dos caudais. Isto acontece pois a variação dos caudais depende diretamente da variação do NAA. Como o *input* para a criação da RNA dos caudais foi o NAA, considera-se normal o facto desta ter conseguido criar um modelo que, de uma maneira geral, se adapta adequadamente aos valores medidos.

Apesar dos problemas referidos anteriormente, as RNA conseguiram sempre adaptar-se de forma a fornecer uma resposta concordante com as anomalias ocorridas. Mesmo no caso dos piezómetros instalados a partir da banquetta sobre o tapete drenante (AB), que devido à sua localização poderiam não ter sido considerados para o estudo, a RNA conseguiu obter resultados satisfatórios. Tal facto revela e comprova a capacidade deste tipo de modelos para se adaptar a situações adversas.

Por outro lado, tal como acontece em todos os modelos de previsão de comportamento, a interpretação dos resultados deve ser acompanhada por um especialista na área, que tenha a capacidade de avaliar os resultados e avaliar se estes fazem, ou não, sentido para o caso em estudo. Como todos os modelos de previsão, estes são construídos para prever ou controlar comportamentos futuros. Devido ao facto de esta RNA se basear na experiência anterior, os resultados estão dependentes disso. É por isso normal que, para situações em que apenas existe instrumentação de um ou dois anos de vida da barragem, os modelos não sejam ainda totalmente representativos do comportamento e a previsão possa não ser ainda totalmente fiável. Para situações iniciais, tal como já foi referido anteriormente, poderá considerar-se, em alternativa, a utilização de modelos determinísticos.

5.3 Trabalhos futuros

No sentido de prosseguir a investigação encetada nesta dissertação, a aplicação deste tipo de modelos poderá ser feita a outras barragens de aterro estudadas ou monitorizadas pelo LNEC, que tenham um conjunto de valores registados significativamente relevantes para que possam ser utilizados. É de destacar que, para que a *Multi Layer Perceptron Backpropagation* possa ser aplicada a outros dados, será necessário desenvolver novas RNA que se adequem a eles. Poderá também ser feita a aplicação de outro tipo de RNA aos dados estudados, ou aos resultantes da proposta anterior. Poderá ser feita a integração destes modelos num sistema de observação do comportamento de barragens por forma a criar um sistema de classificação de gravidade ou do risco associado. Pretende-se, como trabalho futuro, realizar um estudo de estatística descritiva dos resultados obtidos nesta dissertação.

É ainda de referir a importância da organização dos dados por forma a poderem ser facilmente acedidos e serem constantemente atualizados. Assim, a utilização desta base de dados deve sempre prever a validação da informação a utilizar para que os modelos possam produzir resultados mais significativos.

É importante lembrar que este tipo de modelos de RNA utiliza apenas valores normalizados, e apesar da base de dados estar construída de forma a que estes valores saiam já normalizados, é necessário preparar os dados num formato adequado antes de os inserir no programa. Por exemplo, para previsões a longo prazo, em que o fator tempo é uma variável de *input*, é importante normalizar os dados de forma a conseguir deixar um intervalo razoável, entre 0 e 1, para previsões futuras. Por exemplo, normalizar os dias para um intervalo entre 0 e 0,5 possibilitando que os restantes 0,5 sejam para previsões futuras. Poder-se-á também adotar uma normalização não linear, para intervalos de tempo mais alargados.

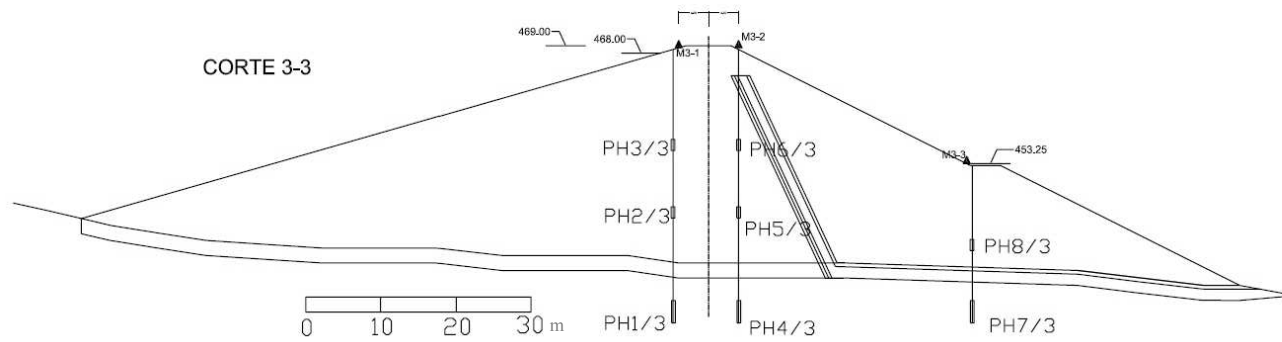
Referências bibliográficas

- Agência Nacional de Águas. (2013). Sistema de Classificação de Barragens.
- Brito, C. (2006). *Redes Neuronais*. (Universidade do Algarve, Faro, Portugal)
- Carrère *et al.* (2013). Guidelines for use of numerical models in dam engineering. Internacional Comission on Large Dams (ICOLD). (No.155).
- Cruz, J. (2013). *O que é inteligência artificial?*. (Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Informática, Lisboa, Portugal).
- Cruz, J. (2014). *Redes neuronais*. (Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Informática, Lisboa, Portugal).
- Carvalho, A. (2009). *Redes Neurais Artificiais*. (Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Computacionais, São Paulo, Brasil) Link: <http://www.icmc.usp.br/~andre/research/neural/index.htm>
- Da Mata, J.T.C. (2007). *Aplicação de redes neuronais ao controlo de segurança de barragens de betão*. Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação (mestrado). Lisboa.
- Decreto-Lei nº344/2007. (s.d.). Regulamento de Segurança de Barragens. Diário da República, 1ª série - nº198, 15-10-2007.
- Fell, R., Mac Gregor, P., & Stapledon, D. (2014). *Geotechnical Engineering of Embankment Dams* (2ª Edição) London: CRC Press. (Chap.8, pp.375-492; Chap.10, pp.567-635)
- Larose, D., & Larose, C. (2014). *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining*. (2ª Edição) New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Marcelino, J. (2005). *Plano de Observação da Barragem de Valtorno-Mourão*. Relatório. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal). (cedido pelo autor).
- Marcelino, J. (2006). *Inspeções visuais de rotina e especialidade*. Apresentação. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal). (cedido pelo autor).
- Marcelino, J. (2008). *Parecer sobre o tratamento da fundação da barragem de Valtorno - Mourão*. Relatório. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal). (cedido pelo autor).
- Marcelino, J. (2014). *Modelos de Previsão*. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal). (cedido pelo autor).
- Masse, E., Curt, C., & Le Goc, M. (2008). *Forecasting Embankment Dam Behaviour with Artificial Intelligence*. Sciences-New York, (1993)
- Oliveira, E. (sem data). Apresentação sobre: *Redes neuronais artificiais*. (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal).
- Pozo, A. (sem data). Slides de *Redes Neurais* (Universidade Federal do Paraná, Departamento de Informática, Paraná, Brasil). Consulta a: 20-01-2015 Link: <http://www.inf.ufpr.br/aurora/tutoriais/Redes%20Neurais%20Artificial.ppt>
- Pujol, *et al.* (in press). *Dam Surveillance Guide*. Internacional Comission on Large Dams (ICOLD). (No.158)

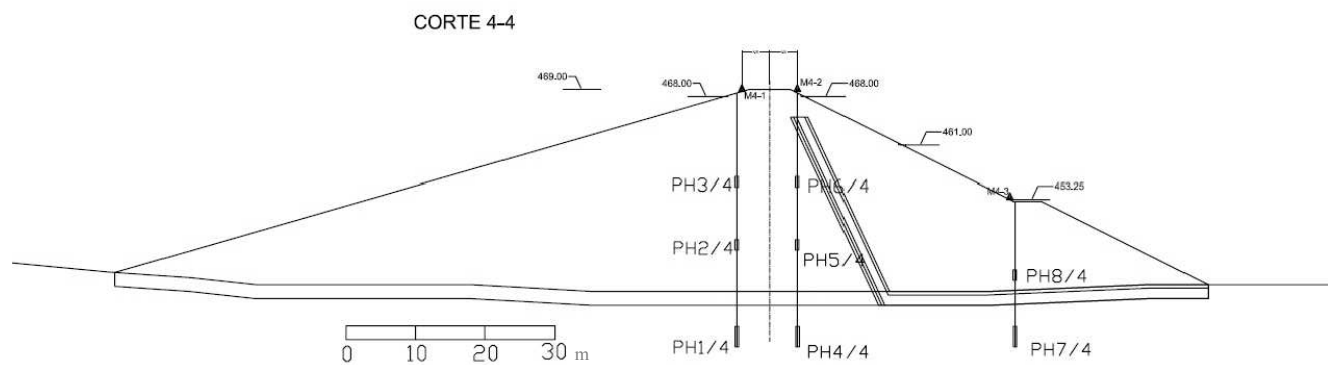
- Russel, S., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence a modern approach*. (3ª Edição). New Jersey: Pearson - Prentice Hall.
- Sá, L. (2007). Regulamento de Segurança de Barragens e a Proteção Civil. (Autoridade Nacional de Proteção Civil).
- Silva, A. (2014). Apontamentos da disciplina de Barragens e Obras Subterrâneas. 2014. *Barragens de aterro, barragens de aterro zonadas, permeabilidade versus gradiente*. (Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Ciências da Terra, Lisboa, Portugal).
- Sousa, D., Teófilo, L., Silva, P., & Costa, R. (2008). Apresentação sobre Redes Neuronais. (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Informática, Porto, Portugal).
- Tavares, J.L.L. (2011). *Aplicação de redes neuronais no planeamento de emergência em barragens de aterro*. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias. Dissertação (mestrado). Lisboa.
- Witten, I., & Frank, E. (2011). *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques* (3ª Edição). Massachusetts: Morgan Kaufmann - Elsevier.

ANEXOS

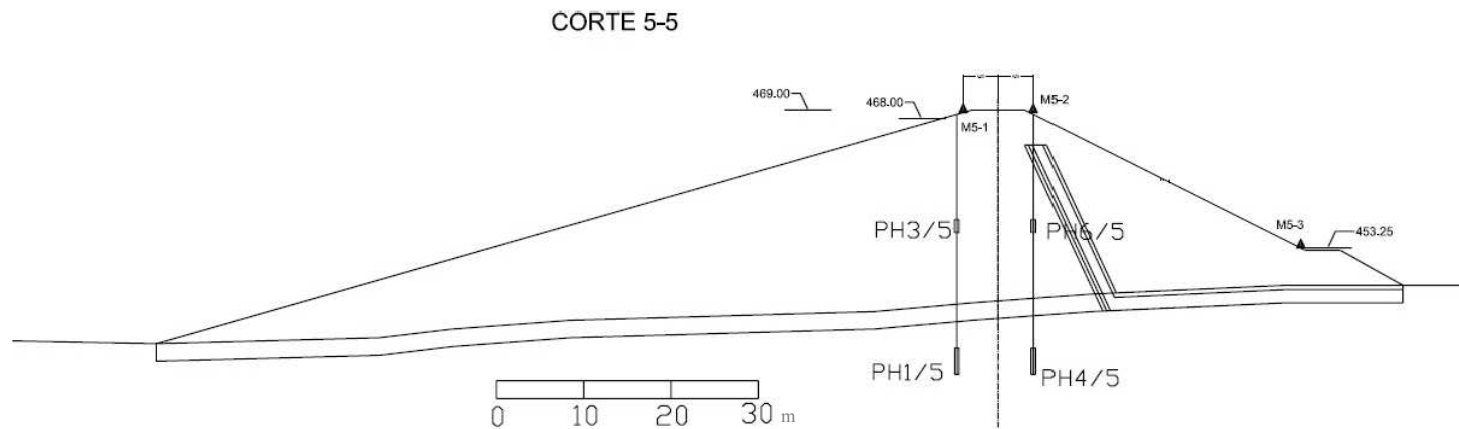
ANEXO I – Perfis transversais com a localização dos piezómetros na barragem e esquema dos medidores de caudais



Perfil transversal do corte 3-3 com a localização dos piezômetros e das marcas superficiais (retirado de Marcelino, 2005)



Perfil transversal do corte 4-4 com a localização dos piezômetros e das marcas superficiais (retirado de Marcelino, 2005)



Perfil transversal do corte 5-5 com a localização dos piezômetros e das marcas superficiais (retirado de Marcelino, 2005)



Esquema dos medidores de caudais – retirado do Parecer de tratamento da fundação da Barragem de Valtorno Mourão (retirado de Marcelino, 2008)

ANEXO II - Estrutura e organização da base de dados

Estruturação da Base de dados Piezómetros

Tabela III 1 – Estrutura da tabela **Barragens**

| Nome do campo | Tipo de dados | Tamanho do campo | Casas decimais | Descrição |
|-------------------|---------------|------------------|----------------|--|
| Barragem | Texto Breve | Não aplicável | Não aplicável | Tabela onde é feita a inserção de todos os campos |
| Piezometro | Texto Breve | Não aplicável | Não aplicável | Tabela onde estão registados todos os dados técnicos dos piezómetros (esta tabela não funciona em conjunto com as restantes) |
| Valor | Número | Duplo | 2 | Deve ser acedida através da tabela Barragem – valor para cada data e piezómetro |
| Data | Data/hora | Não aplicável | Não aplicável | Deve ser acedida através da tabela Barragem – datas para cada barragem |

Tabela III 2 – Estrutura da tabela **Piezometros**

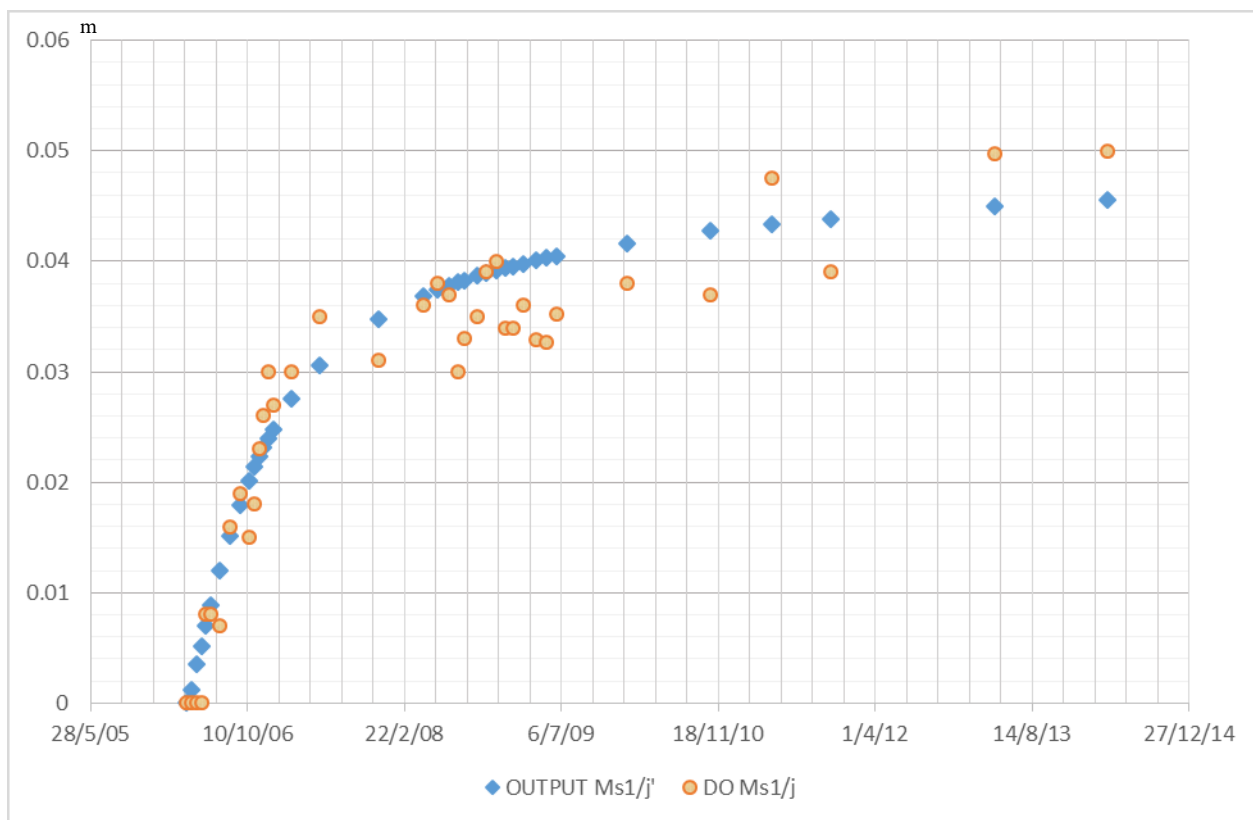
| Nome do campo | Tipo de dados | Tamanho do campo | Casas decimais | Descrição |
|---------------------|---------------|------------------|----------------|--|
| Barragem | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Nome da barragem |
| Piezometro | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Identificação do Piezómetro |
| LocPerfil | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Localização - Perfil |
| LocAterro | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Localização – na barragem |
| Profundidade | Número | Duplo | 2 | Qual a profundidade do piezómetro |
| CotaBTubo | Número | Duplo | 2 | Qual a cota da boca do tubo |
| Cota PPorosa | Número | Duplo | 2 | Qual a cota da ponta porosa |
| Observações | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Observações relevantes como: seco ou obstruído |

Estruturação da Base de dados Marcas Superficiais

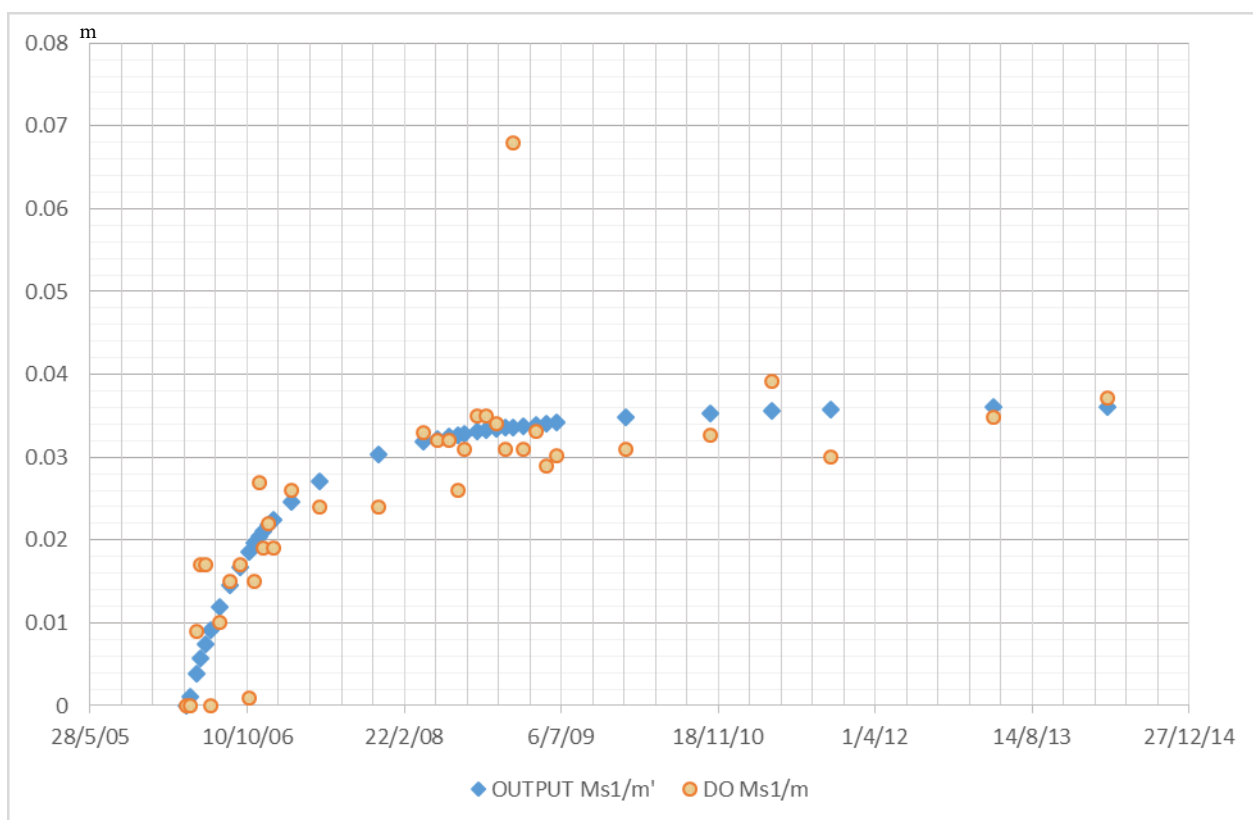
Tabela III 3 - Estrutura da tabela **Barragens**

| Nome do campo | Tipo de dados | Tamanho do campo | Casas decimais | Descrição |
|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|--|
| Barragem | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Nome da barragem |
| Data | Data/hora | Não aplicável | Não aplicável | Deve ser acedida através da tabela Barragem – datas para cada barragem |
| Marca nº | Texto Breve | 255 | Não aplicável | Deve ser acedida através da tabela Barragem - identificação da Marca |
| Assentamentos | Número | Duplo | 4 | Deve ser acedida através da tabela Barragem – valor do assentamento por data e marca |
| Coordenada X | Número | Duplo | 4 | Deve ser acedida através da tabela Barragem – coordenada x por marca |
| Coordenada Y | Número | Duplo | 4 | Deve ser acedida através da tabela Barragem – coordenada y por marca |

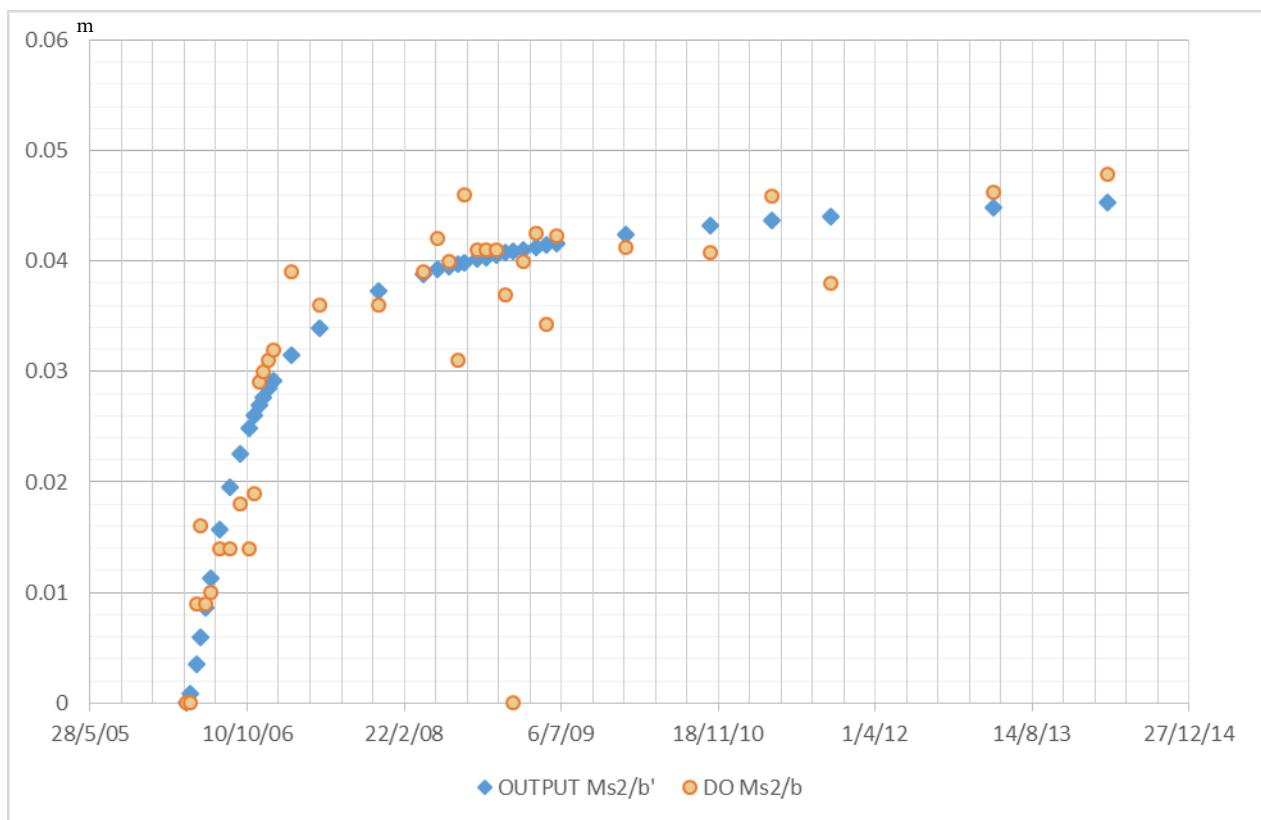
ANEXO III – Gráficos valores medidos *versus* valores calculados para os
caudais, cada piezómetro, e cada marca superficial



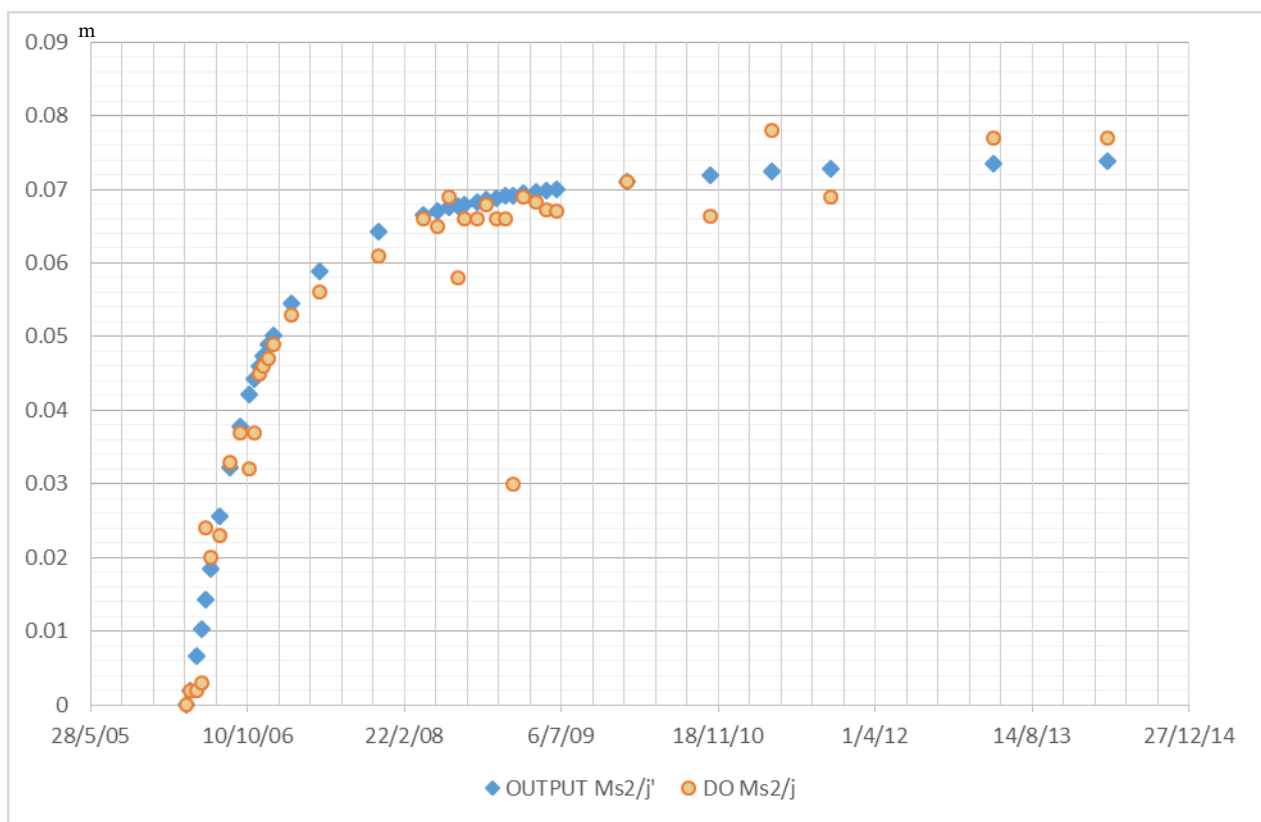
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms1/j



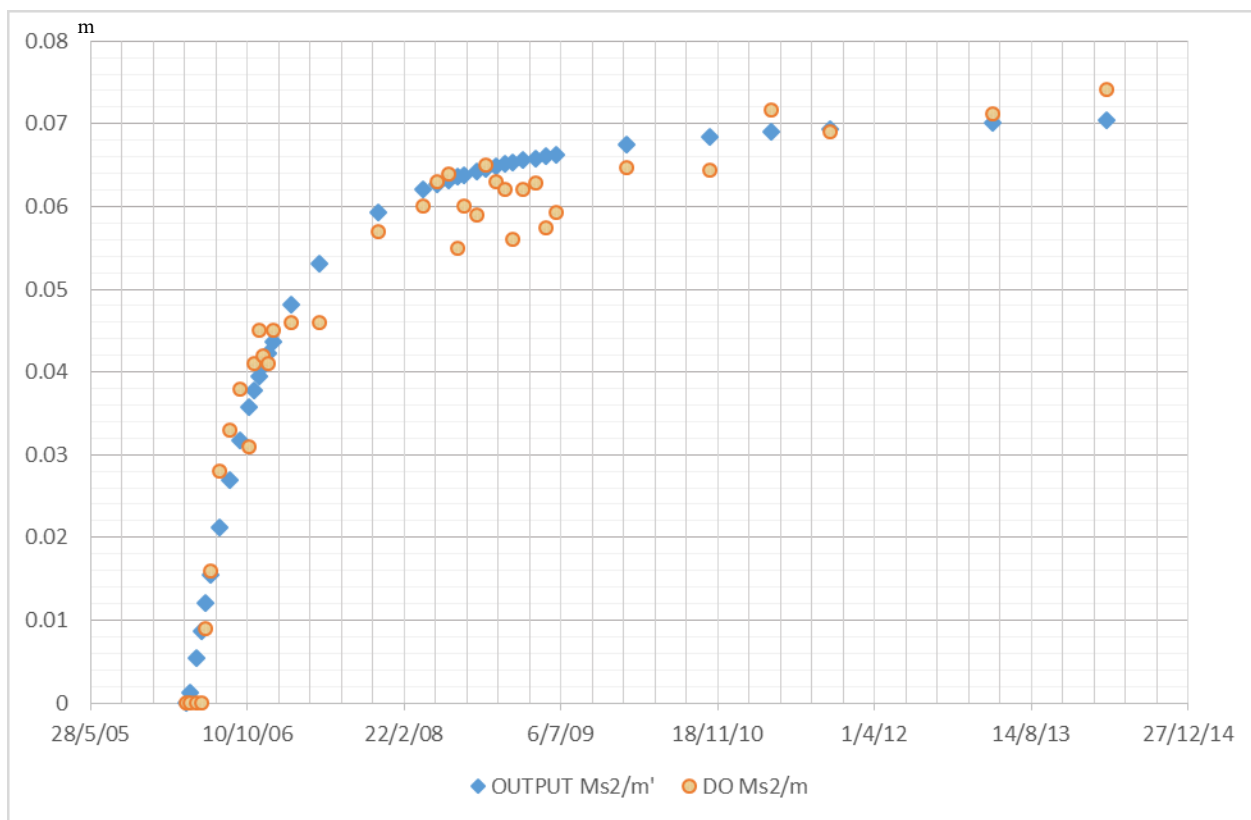
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms1/m



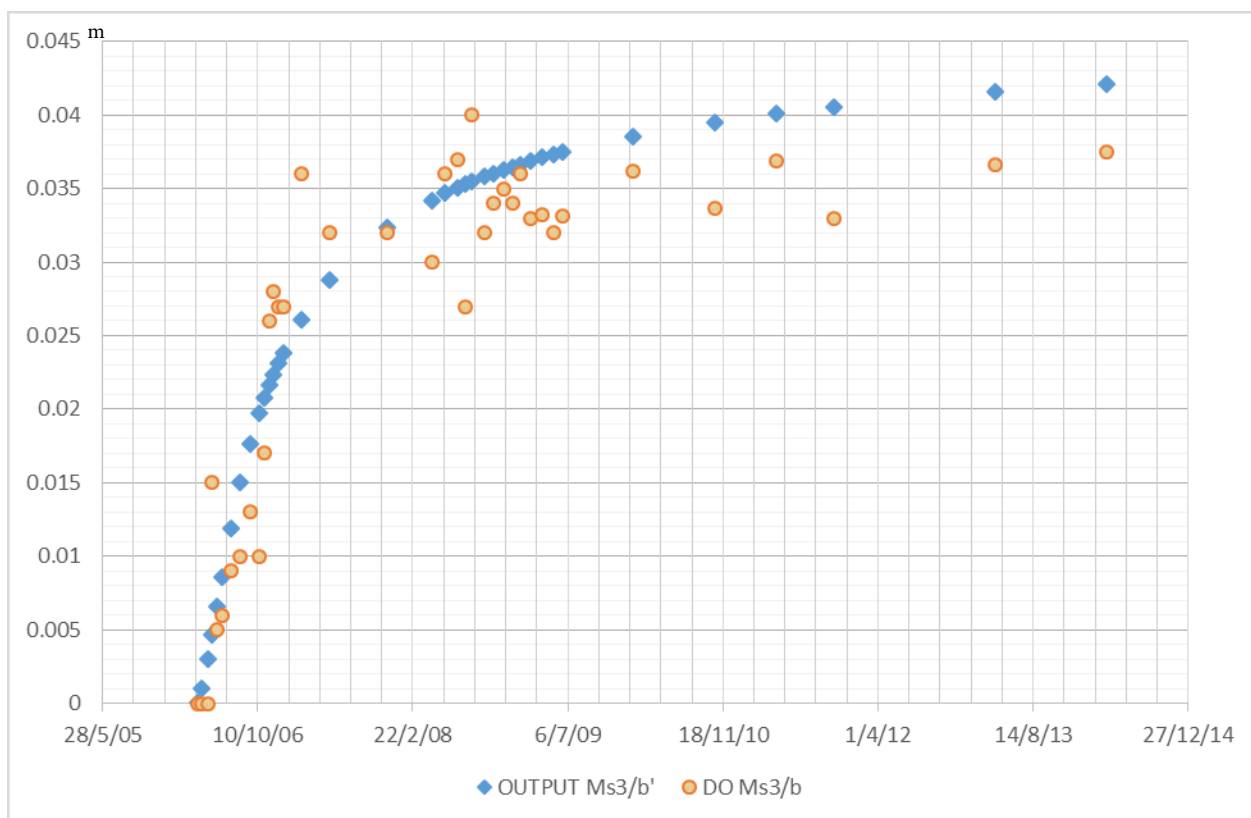
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms2/b



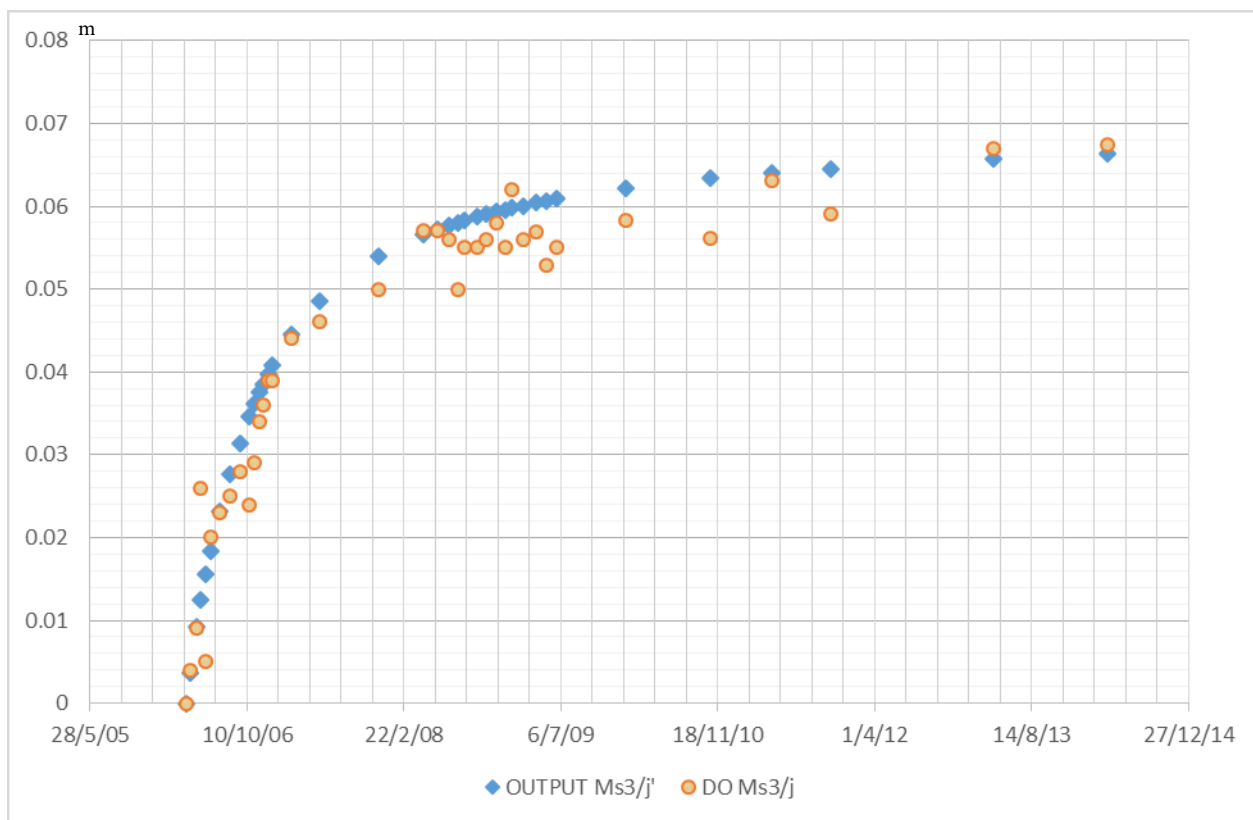
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms2/j



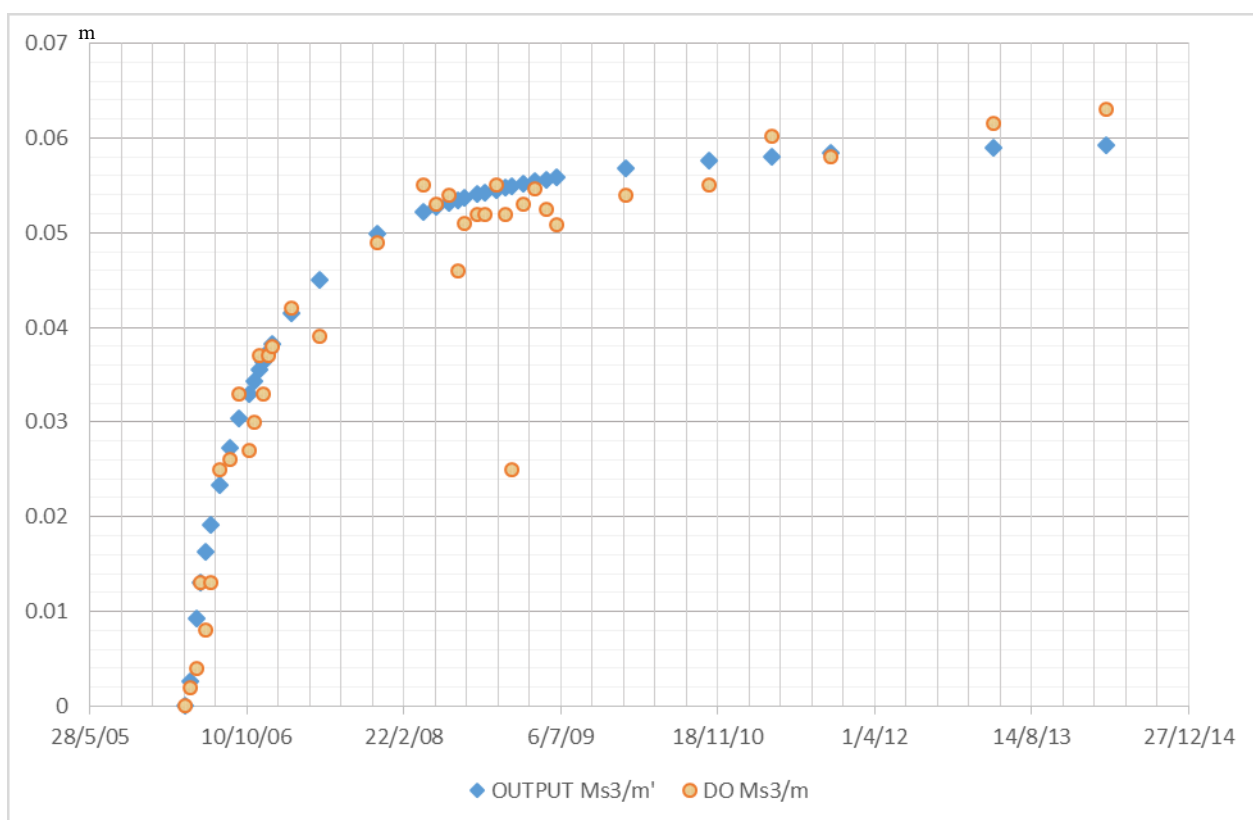
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms2/m



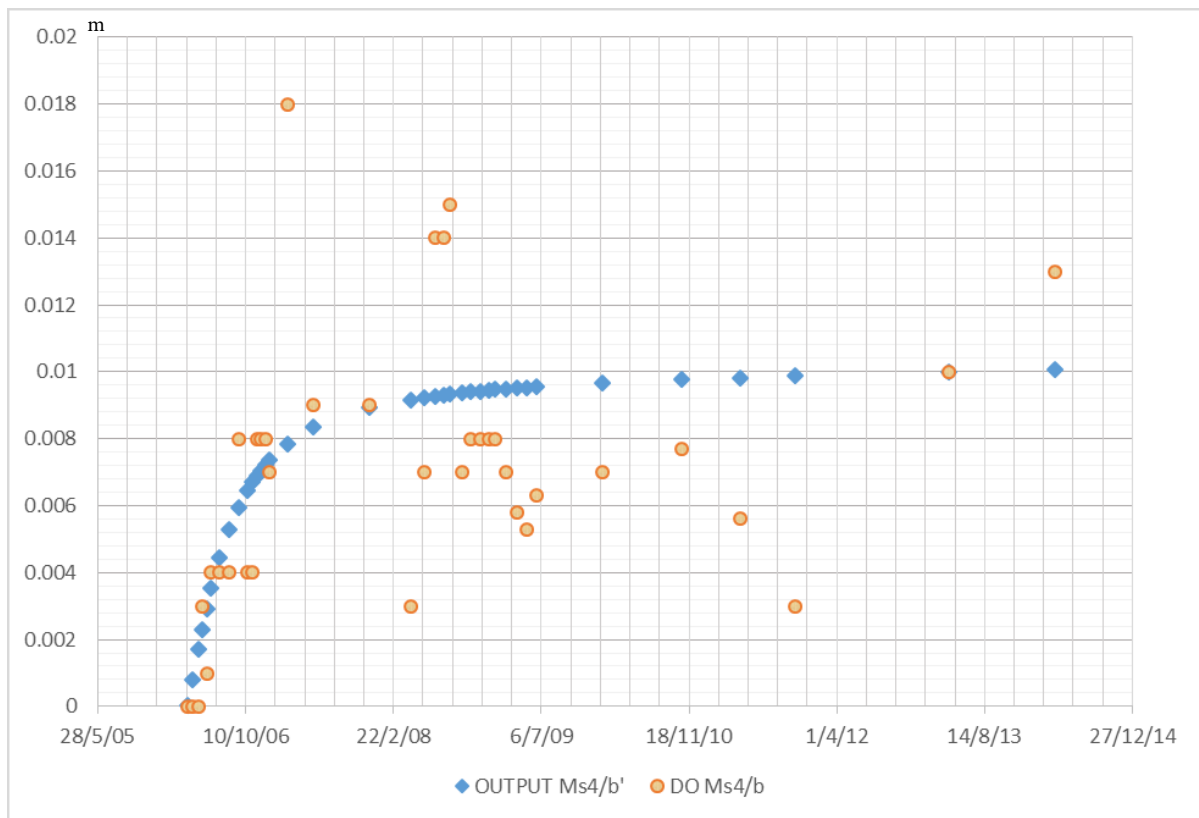
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms3/b



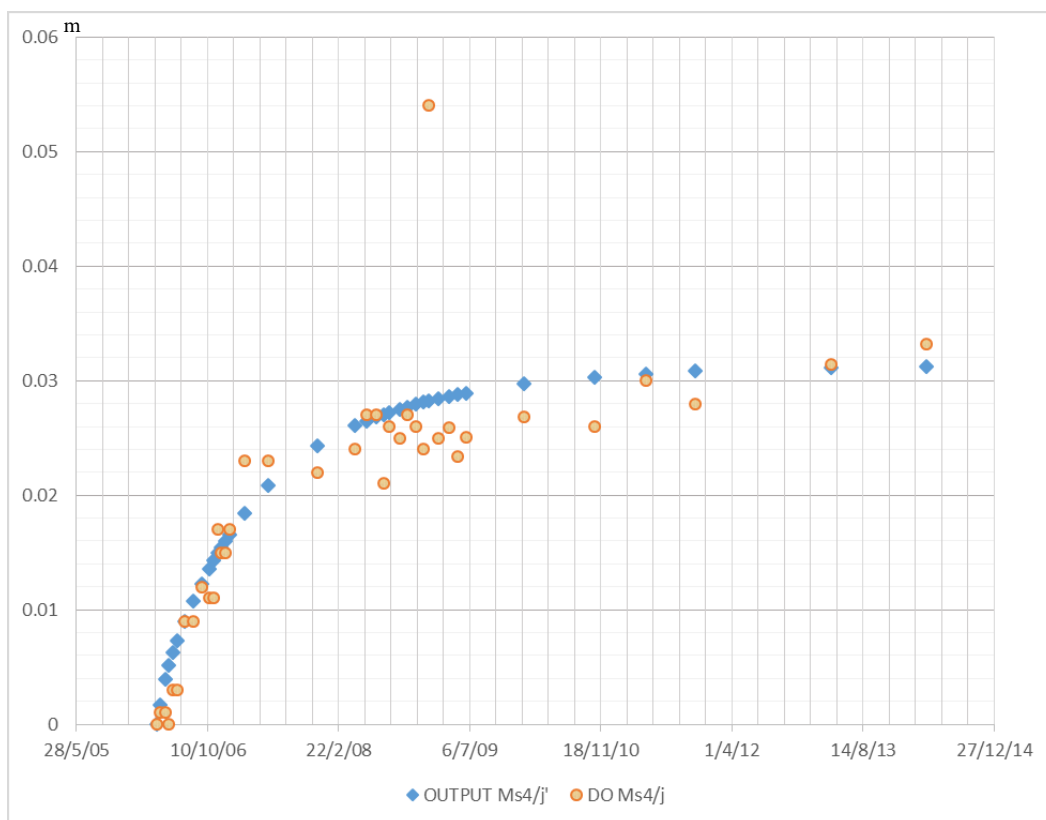
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms3/j



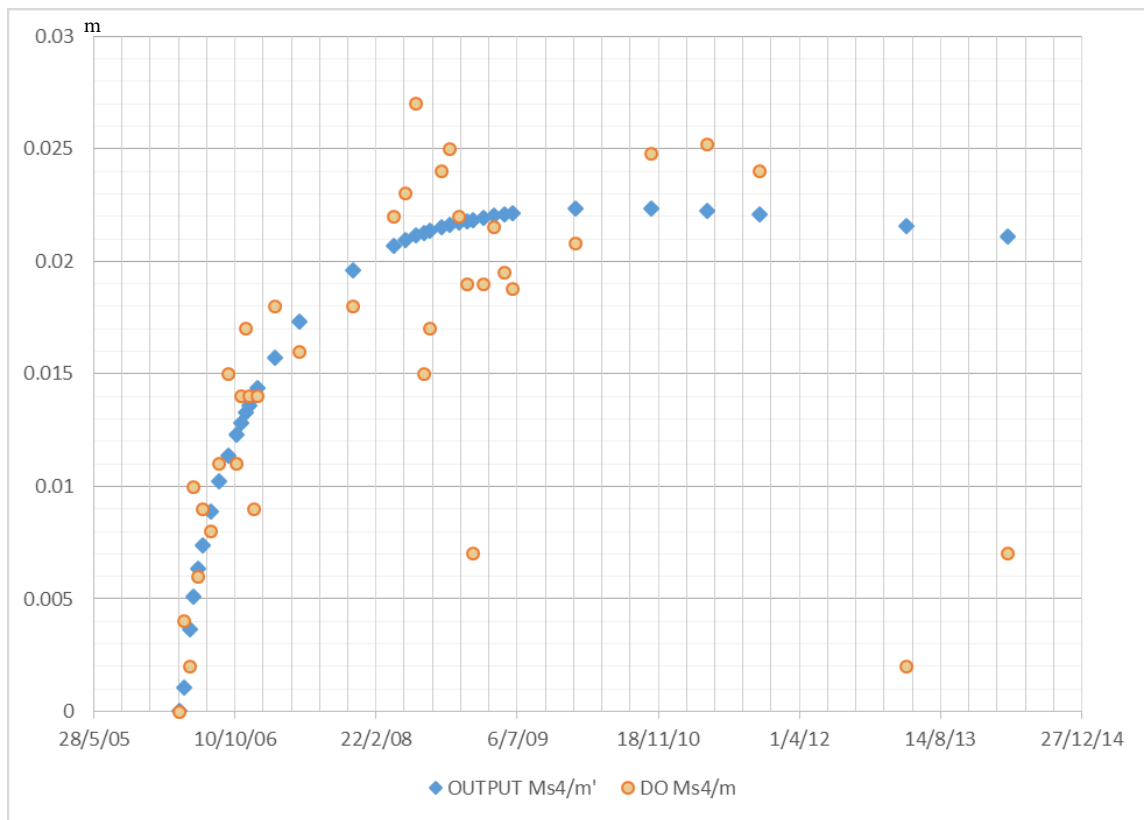
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms3/m



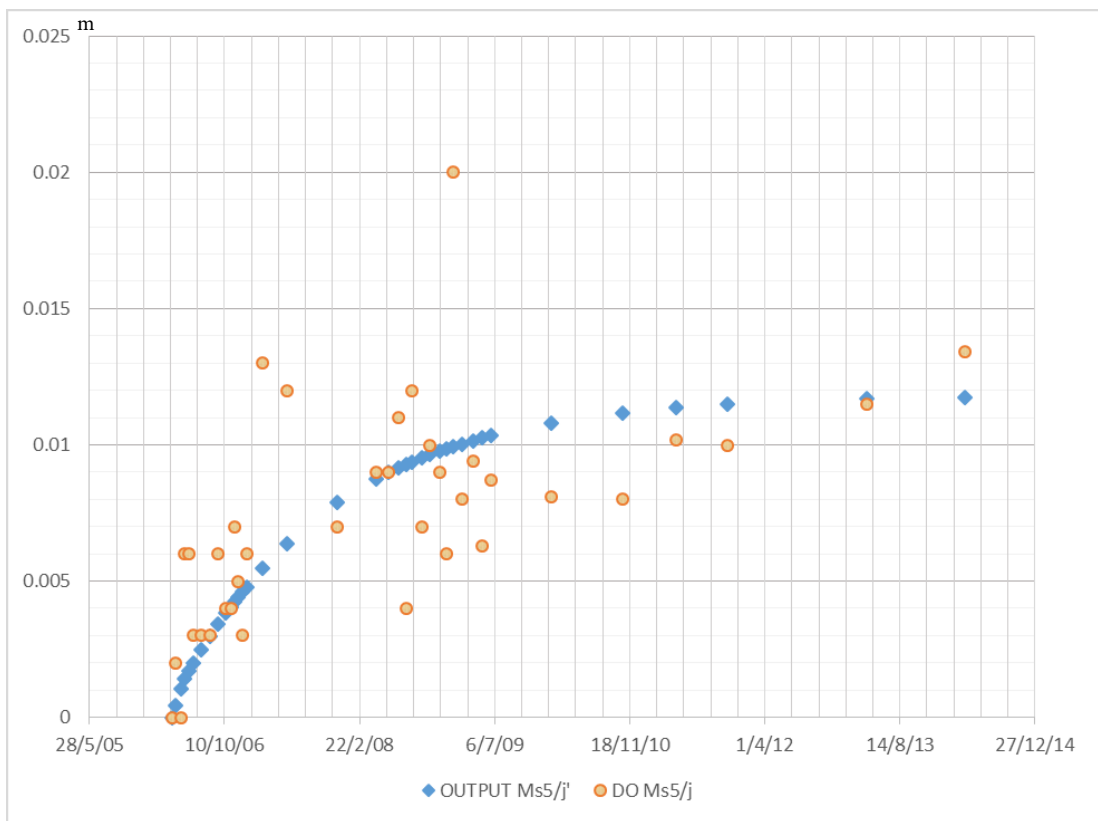
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms4/b



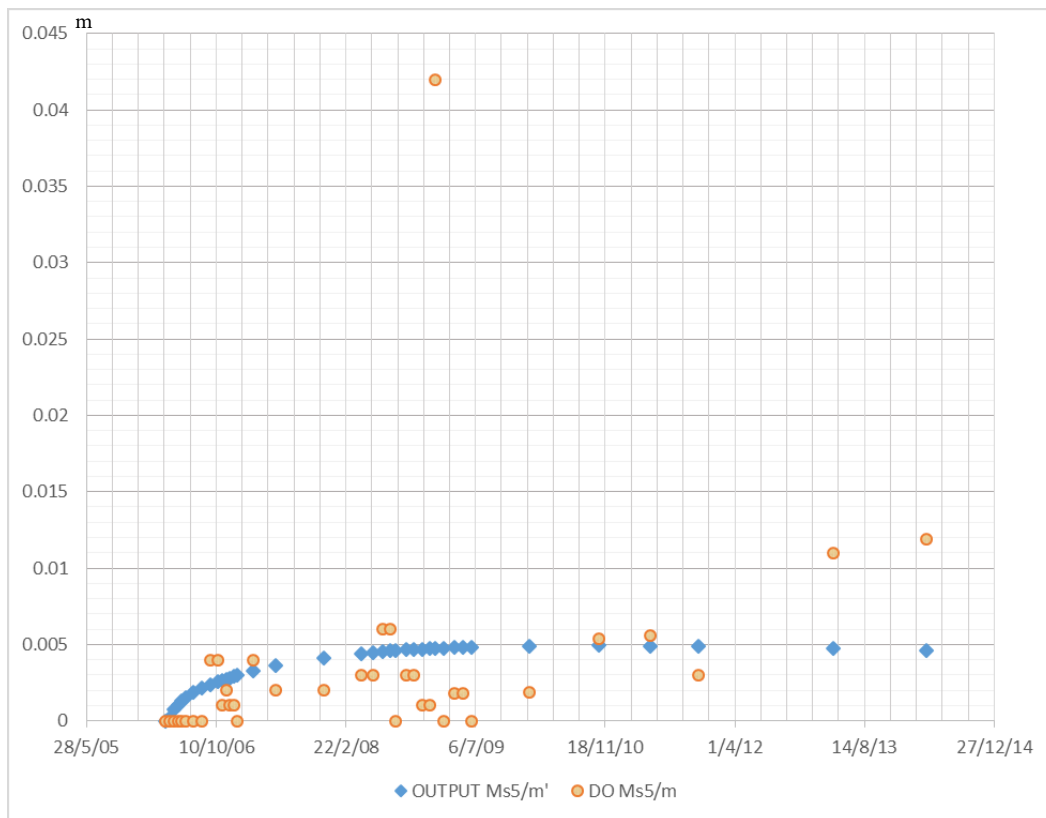
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms4/j



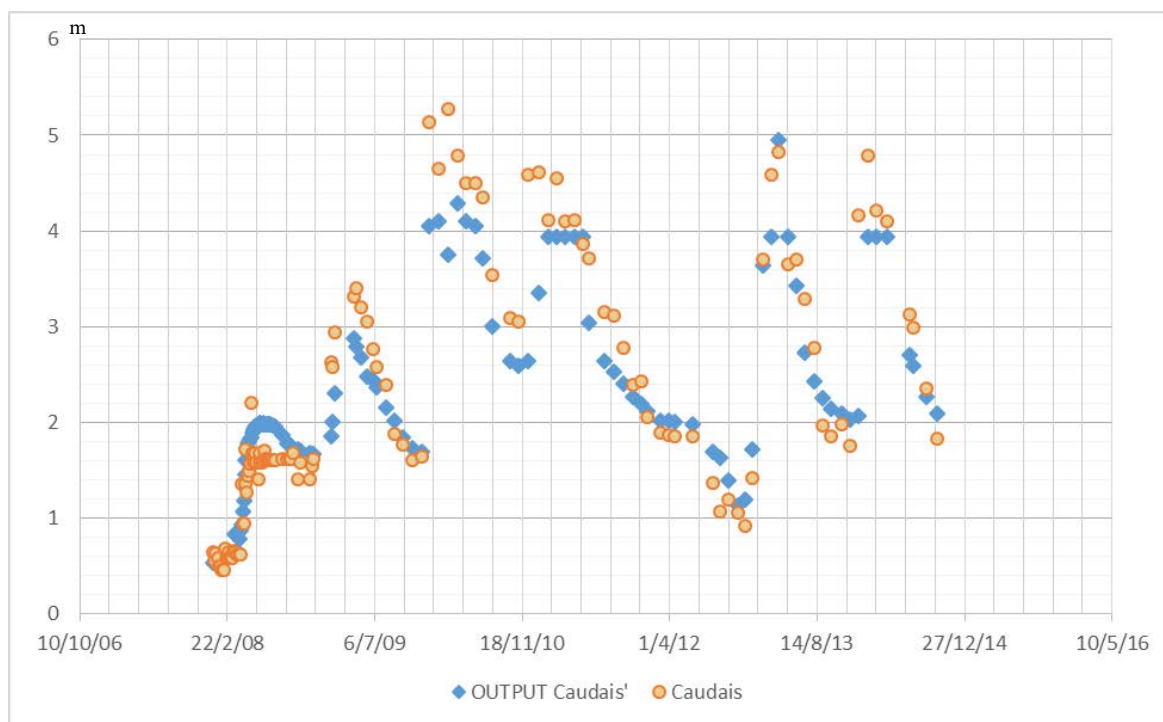
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms4/m



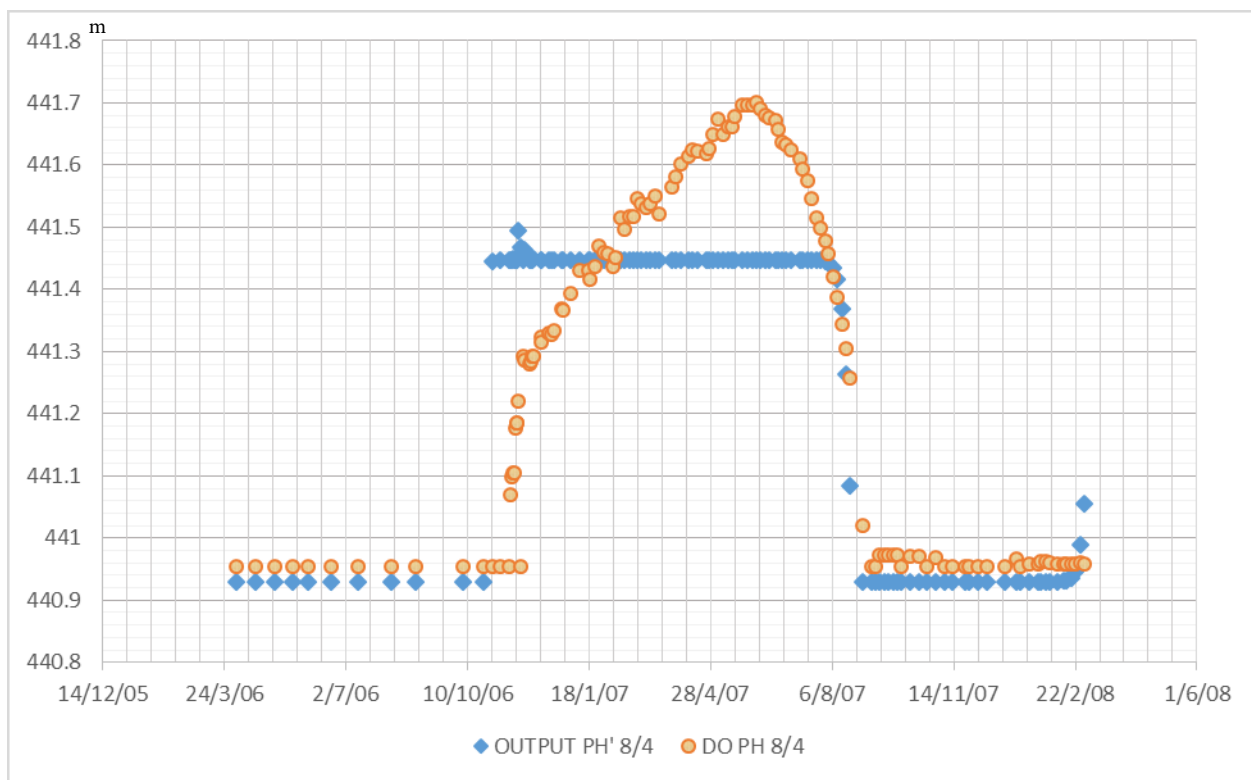
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms5/j



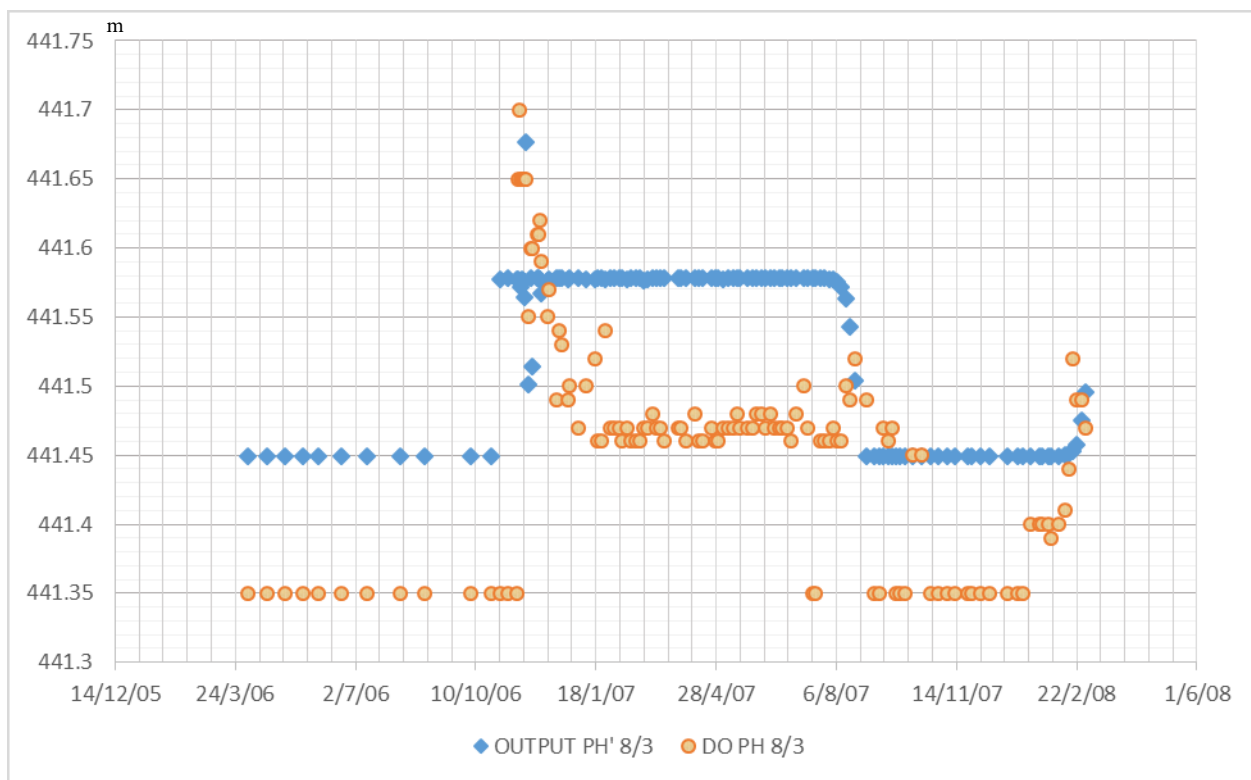
Output versus Desired Output - DO para a marca superficial: Ms5/m



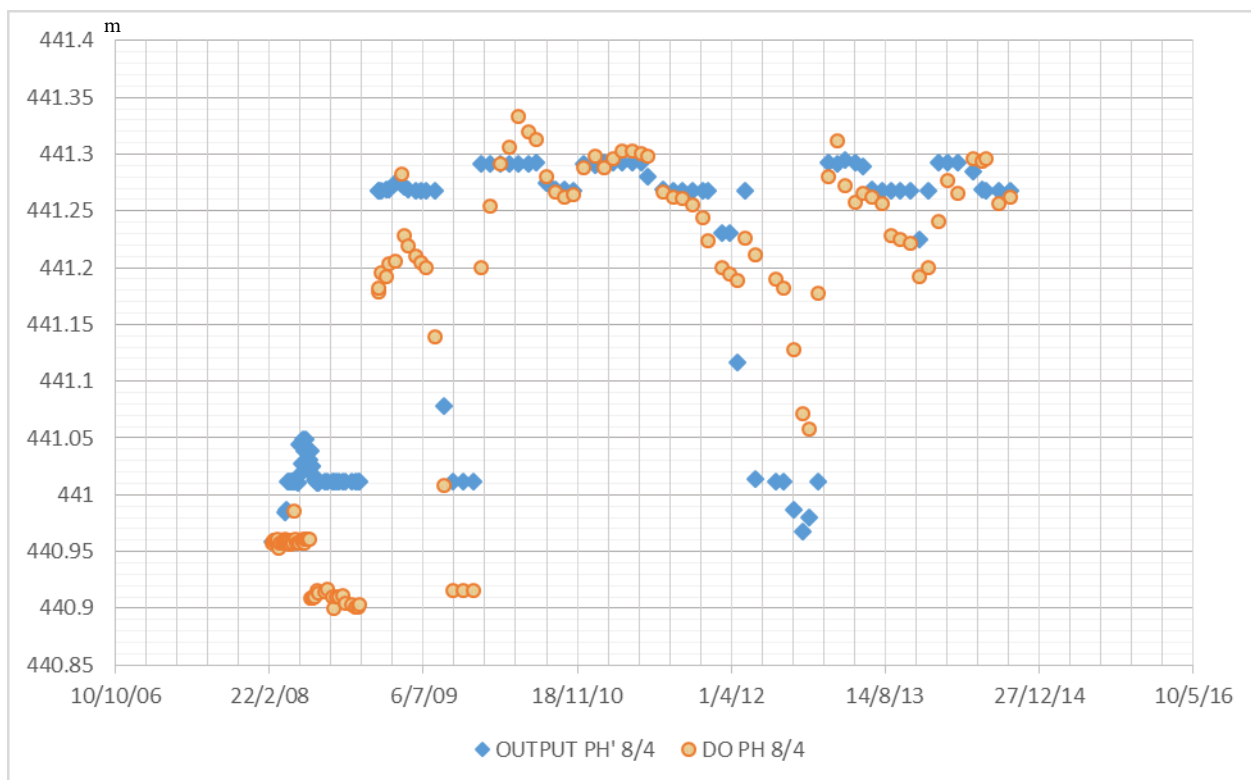
Output versus Desired Output - DO para os caudais – após o tratamento



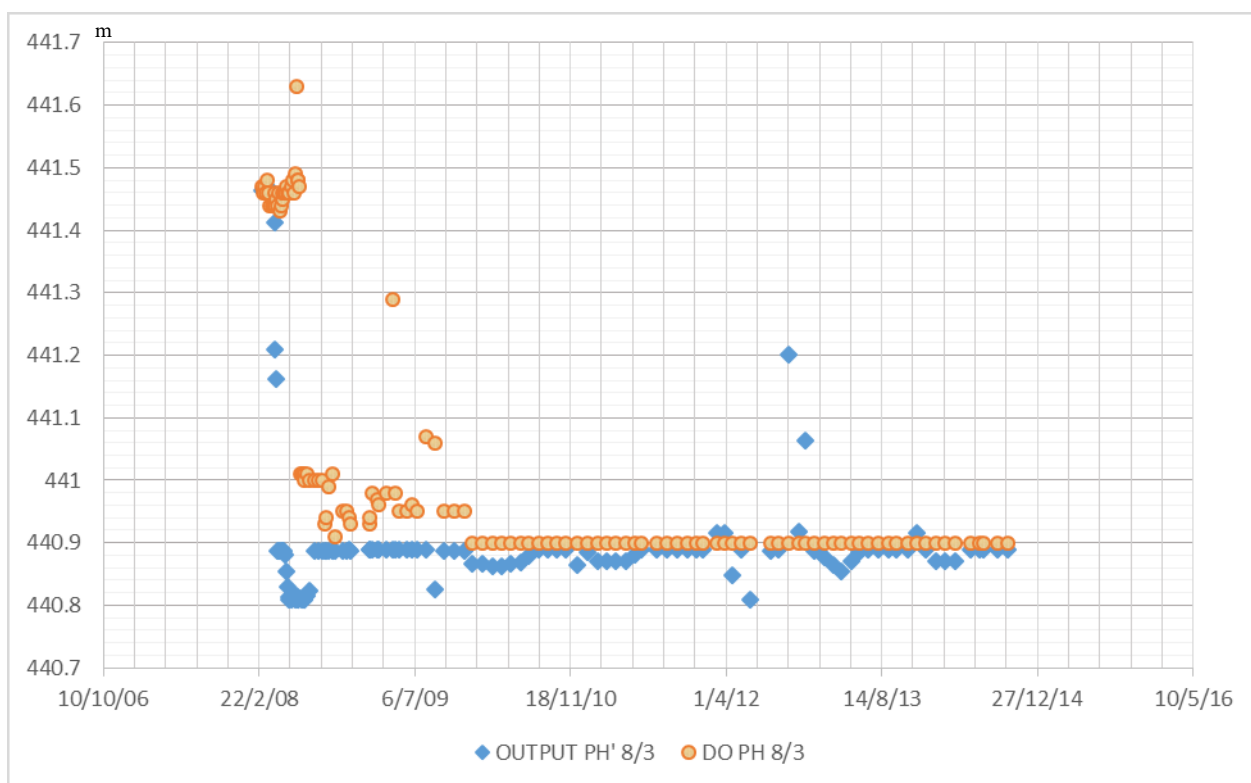
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 8/4 – AB até ao tratamento



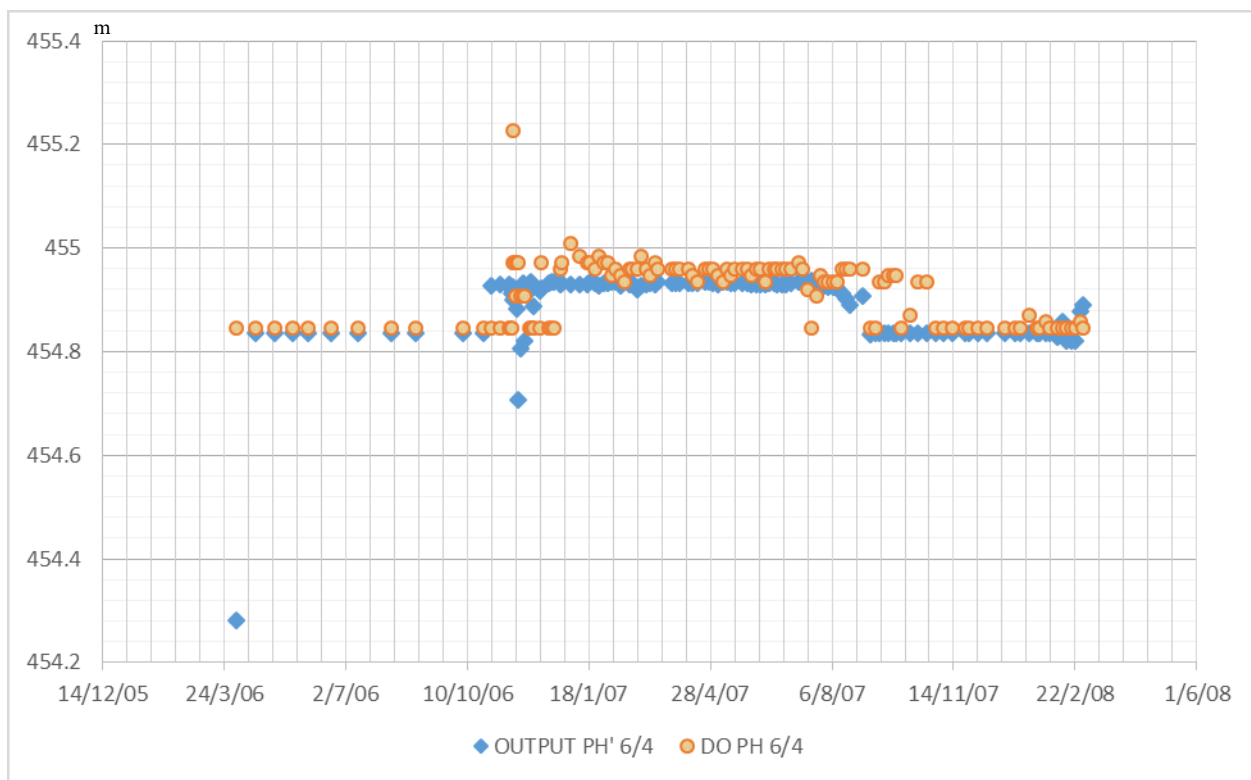
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 8/3 – AB até ao tratamento



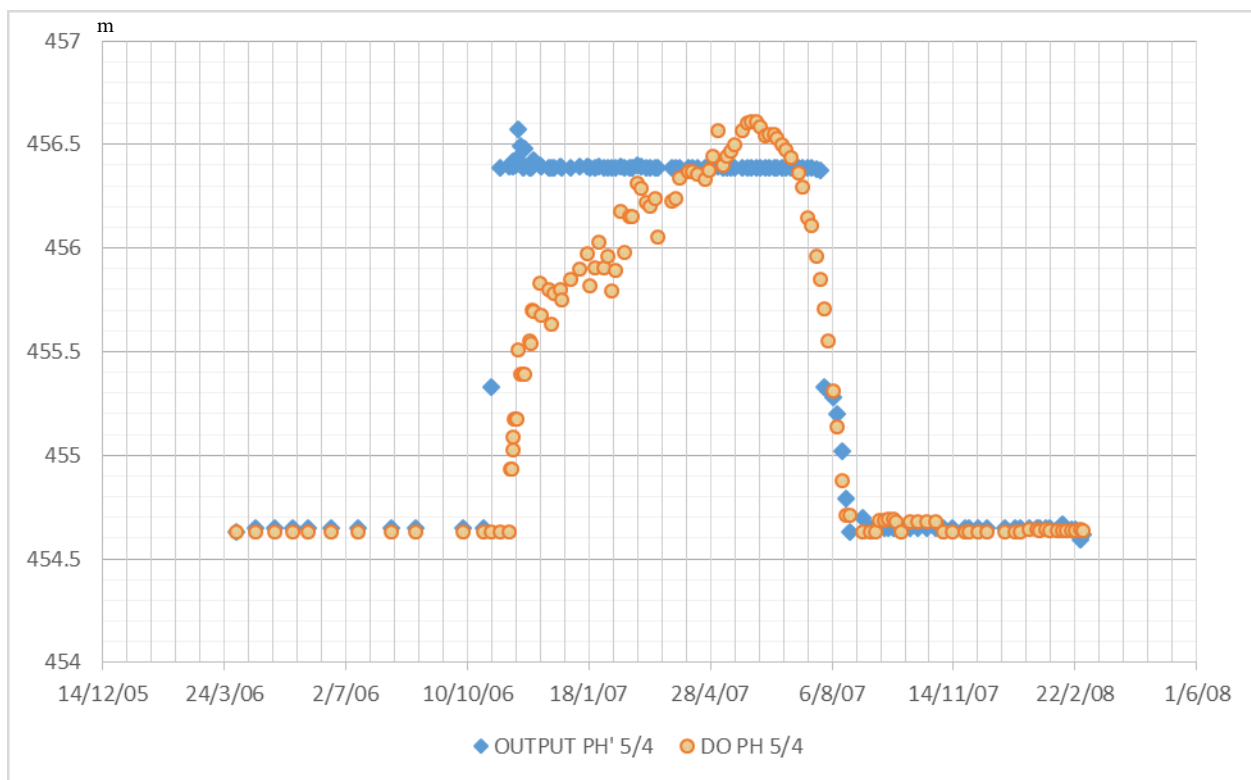
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 8/4 – AB após o tratamento



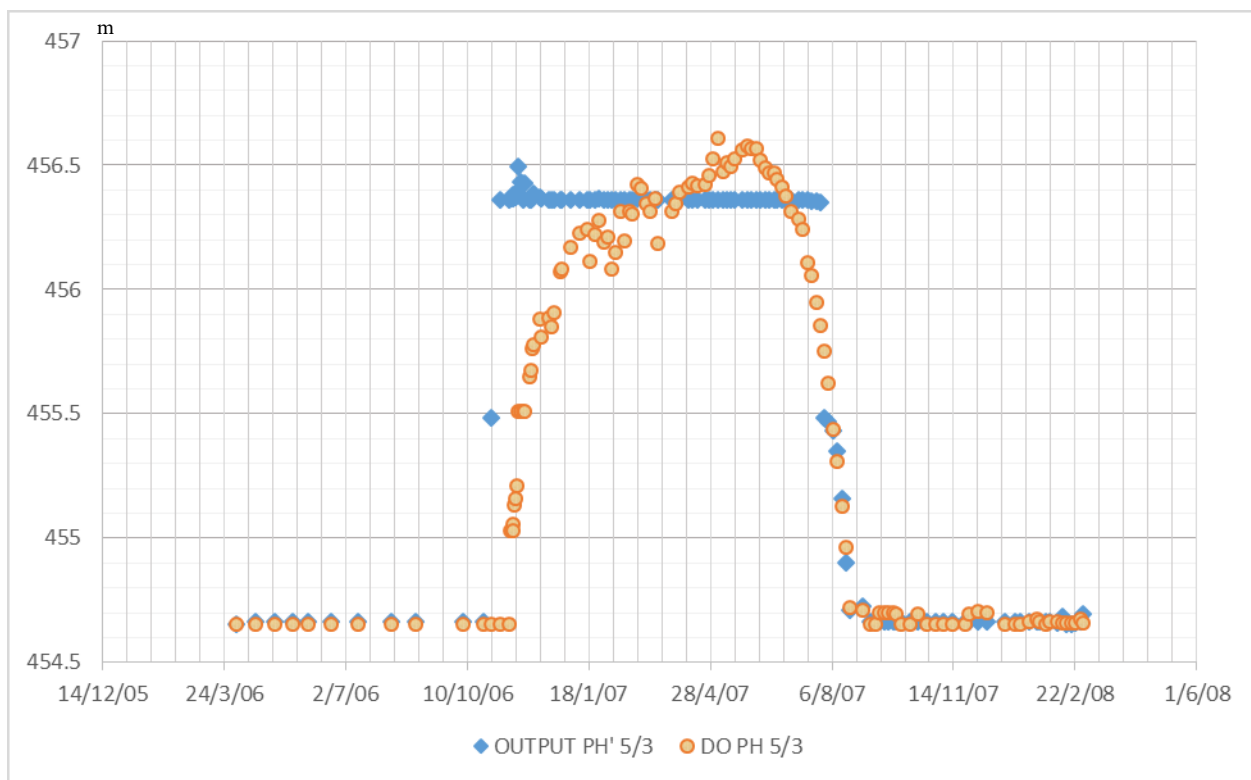
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 8/3 – AB após o tratamento



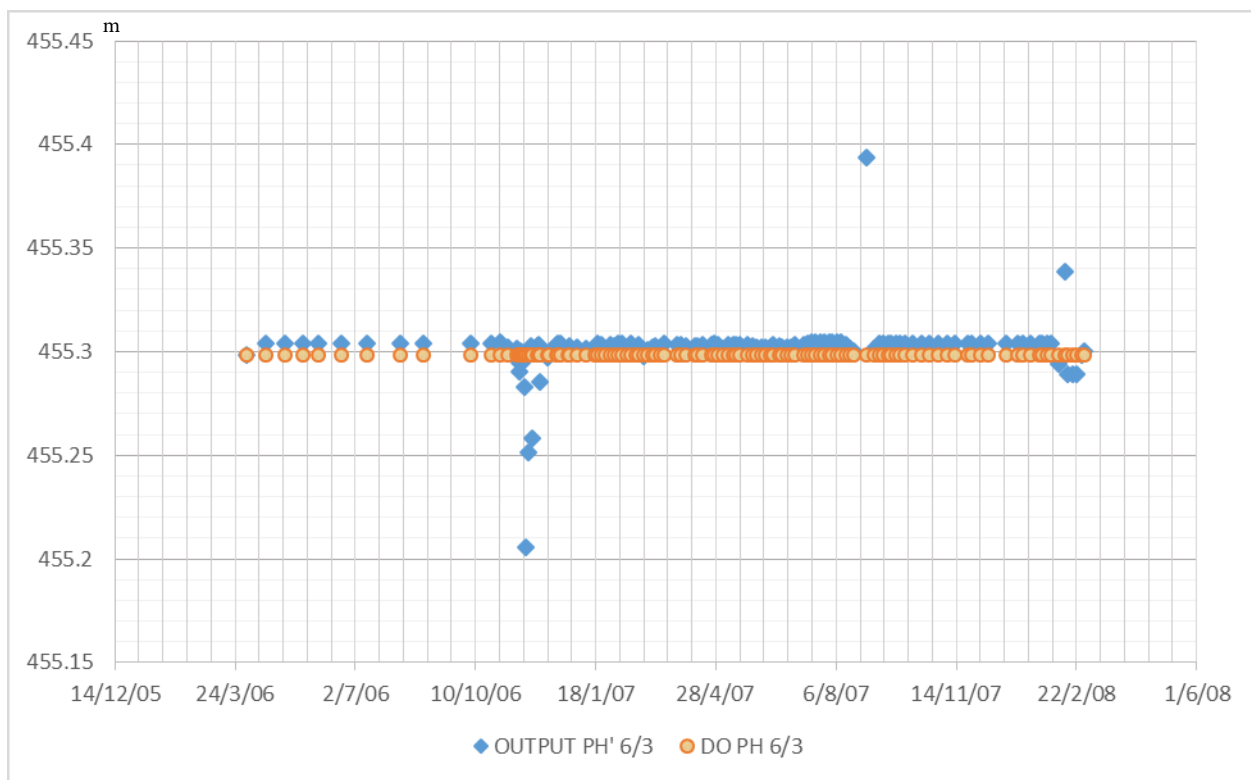
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 6/4 – ACJ até ao tratamento



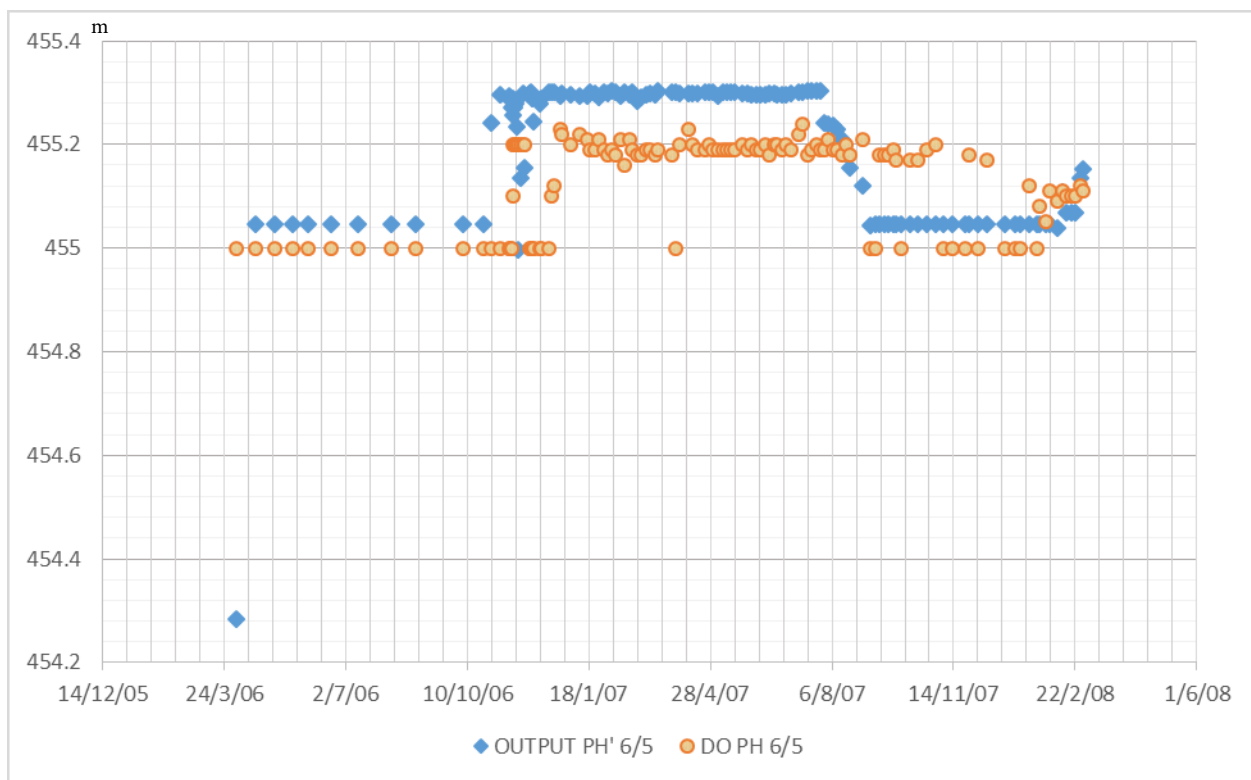
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 5/4 – ACJ até ao tratamento



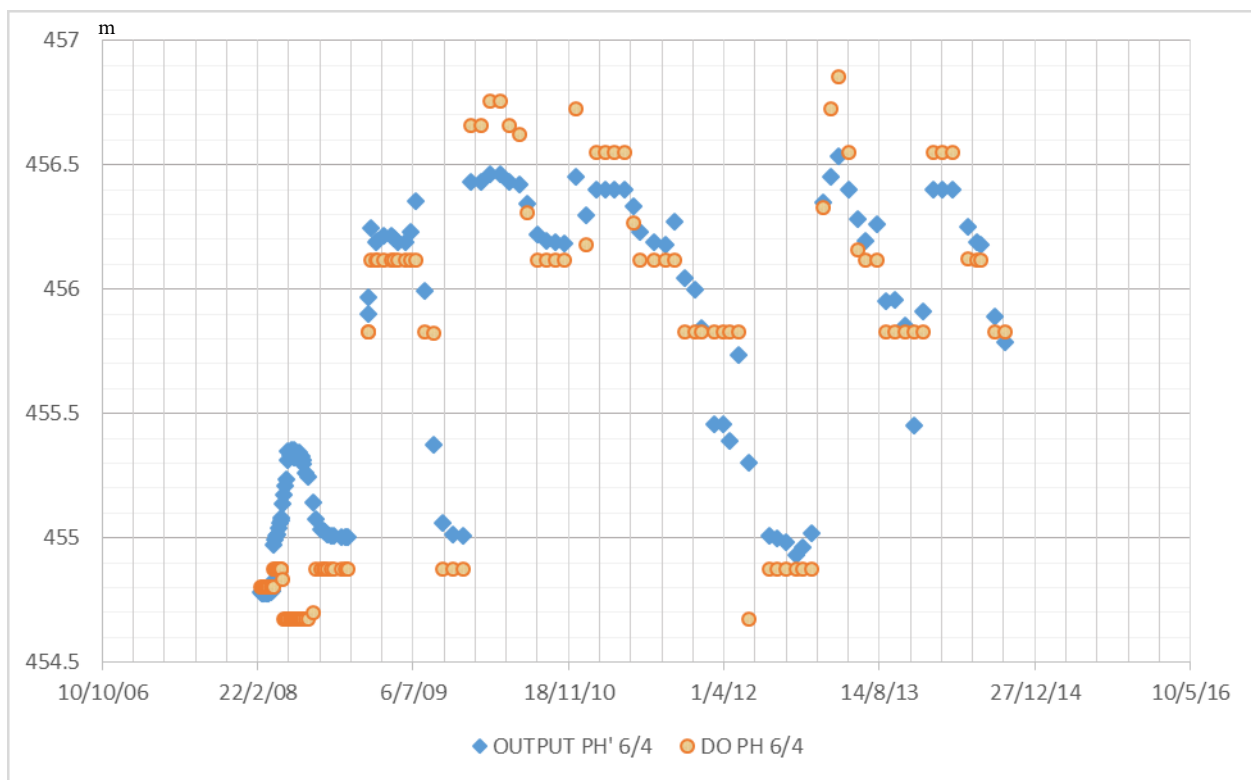
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 5/3 – ACJ até ao tratamento



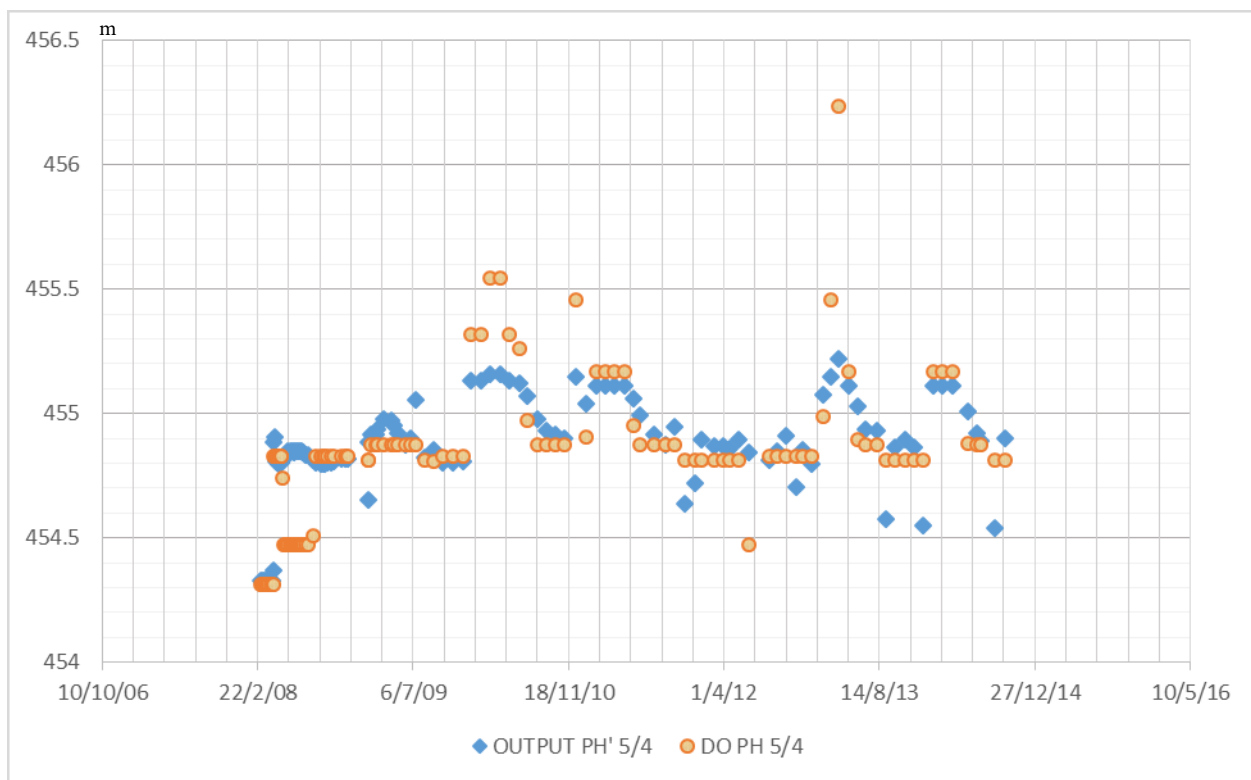
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 6/3 – ACJ até ao tratamento



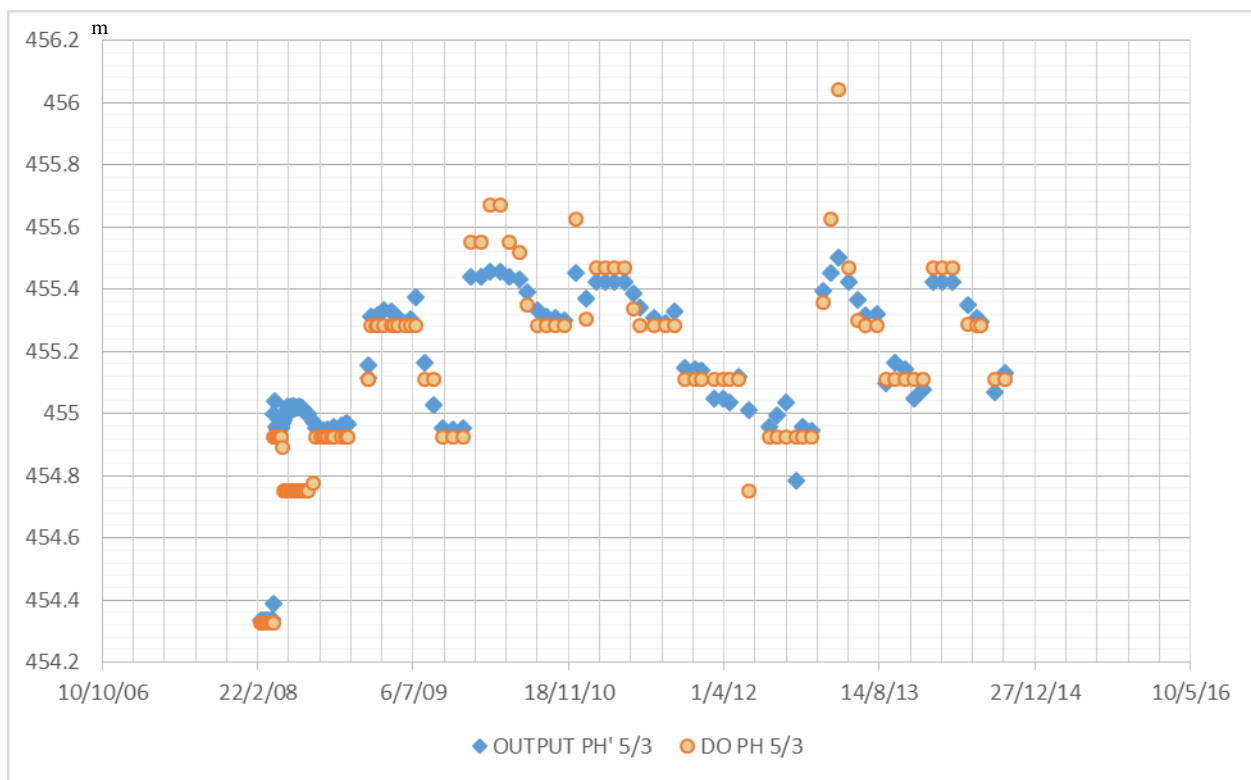
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 6/5 – ACJ até ao tratamento



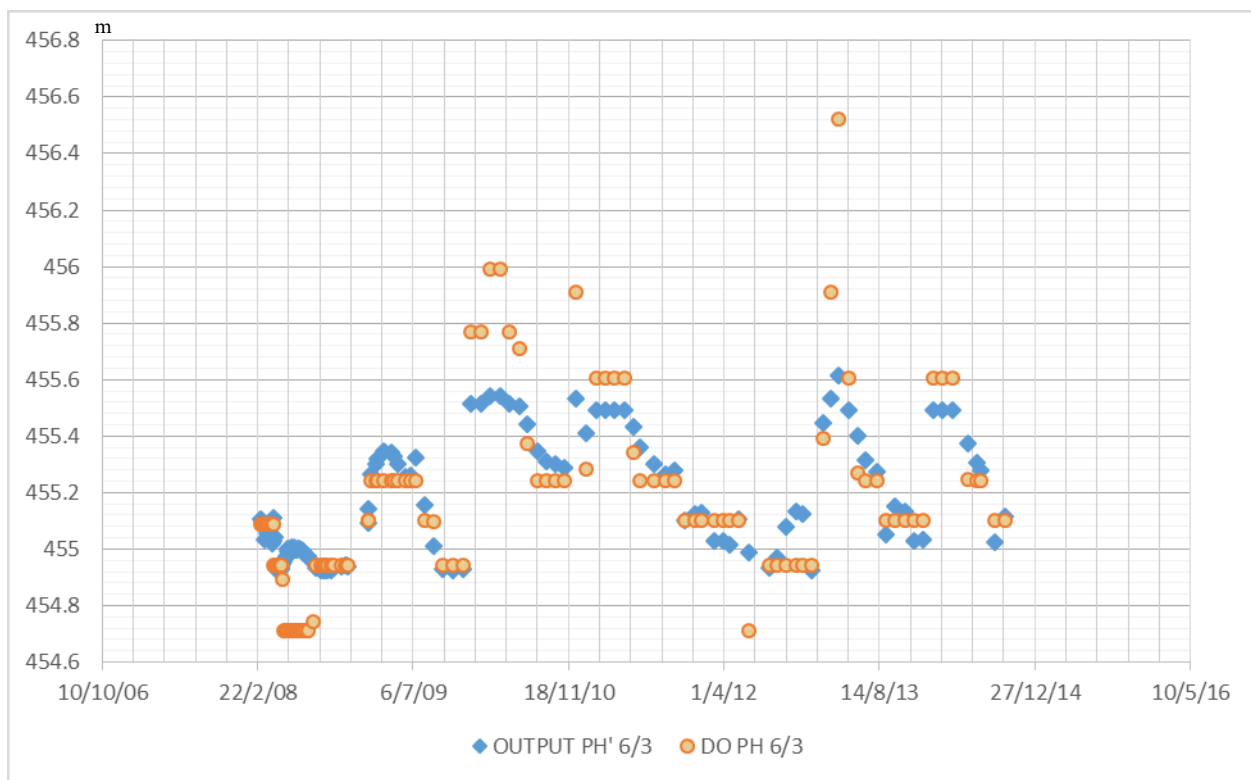
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 6/4 – ACJ após o tratamento



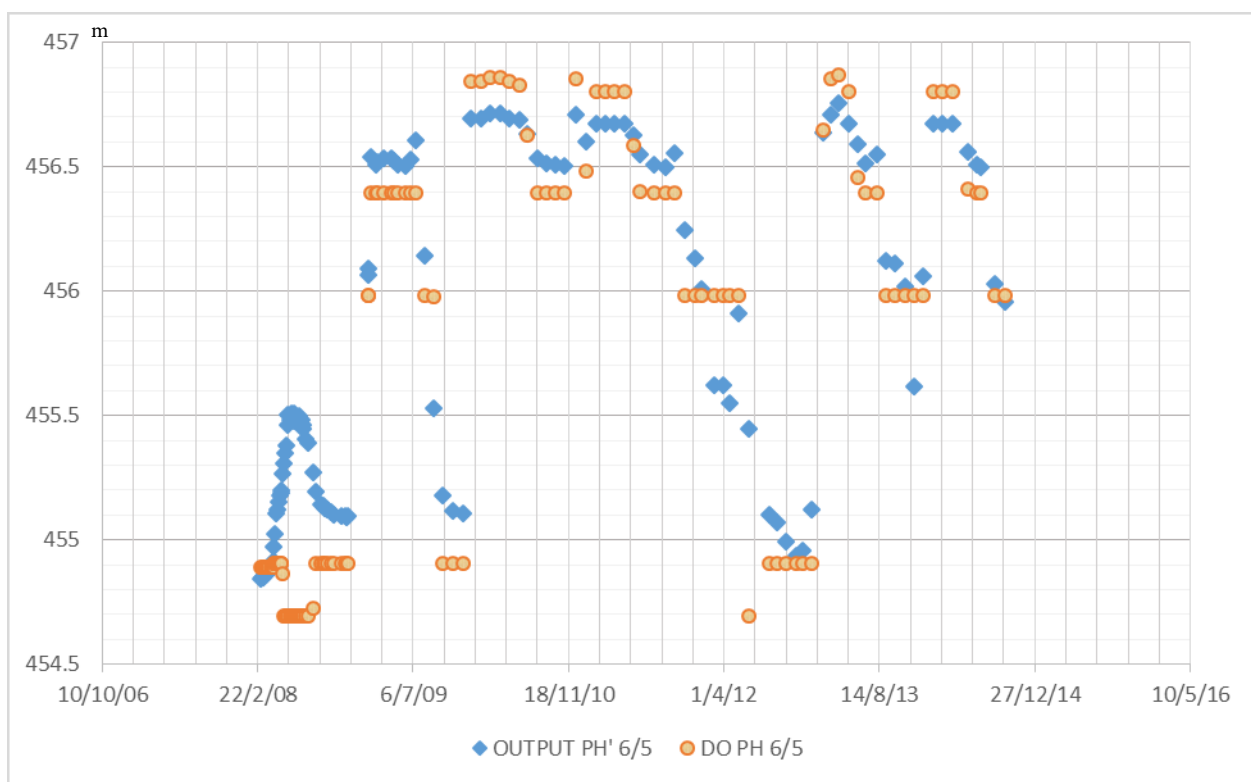
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 5/4 – ACJ após o tratamento



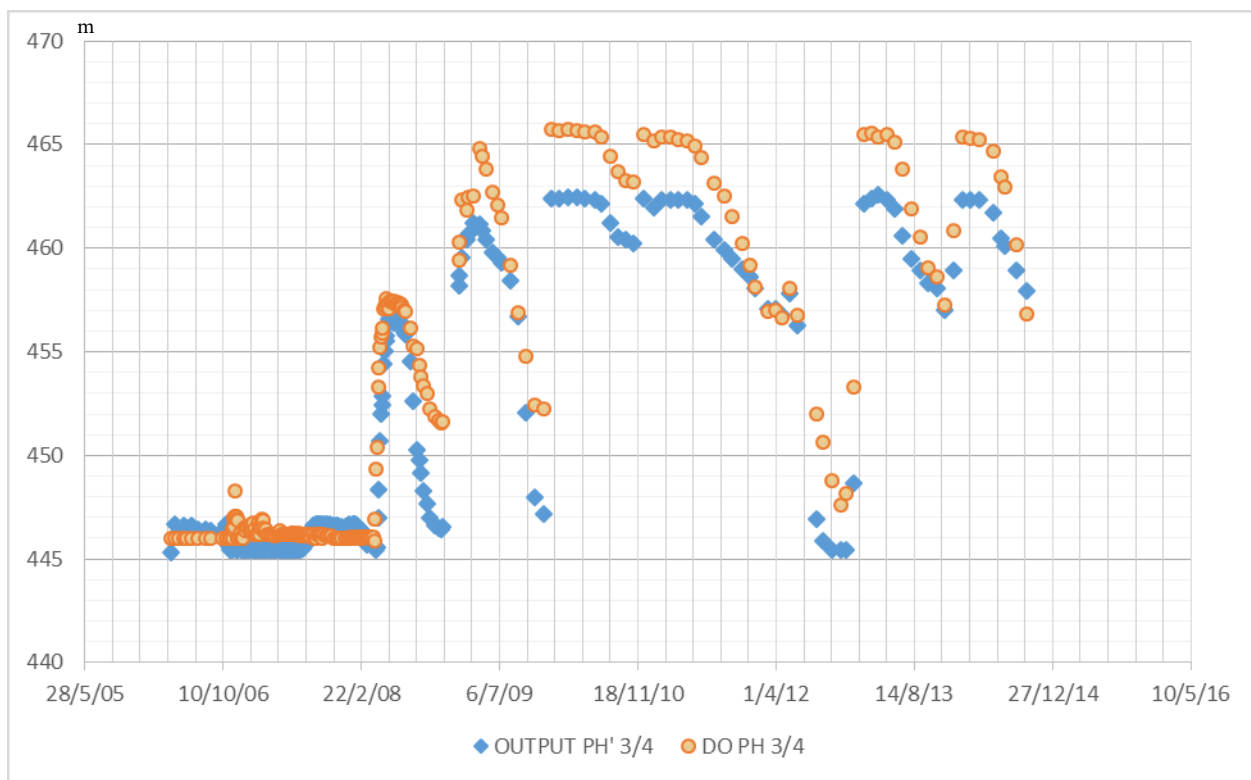
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 5/3 – ACJ após o tratamento



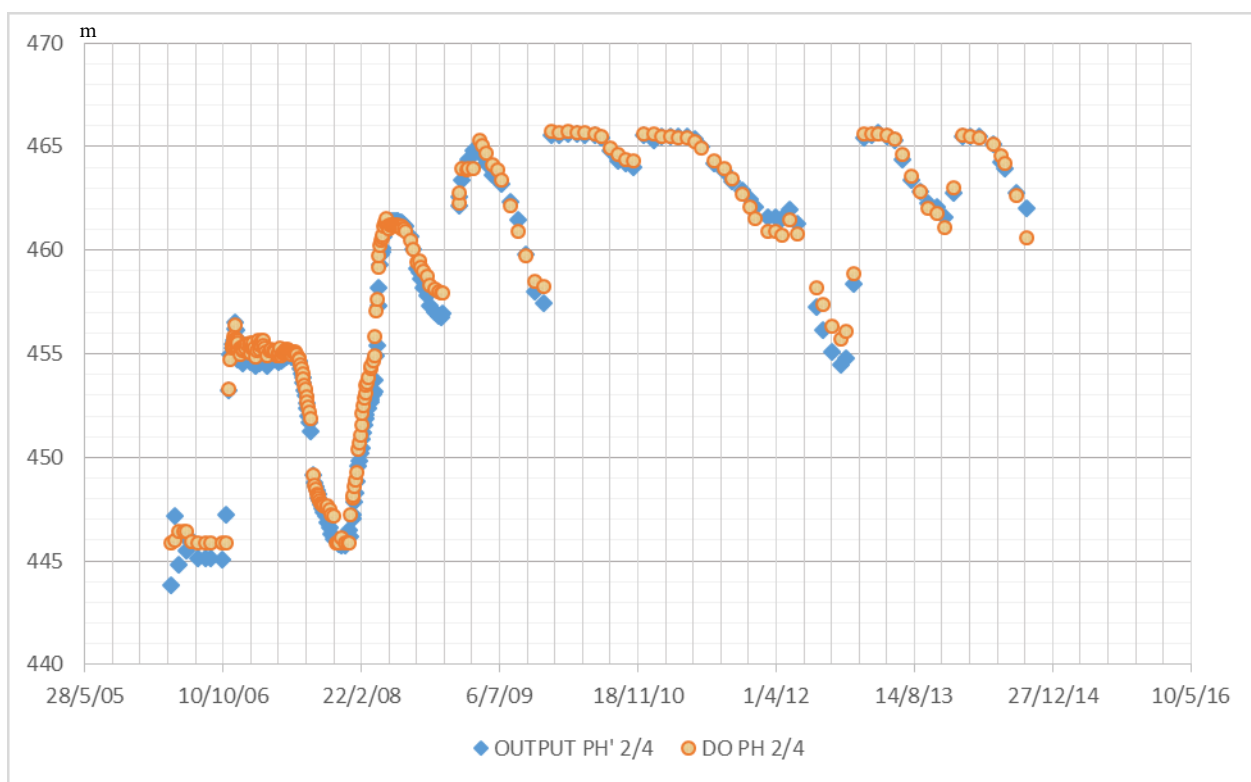
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 6/3 – ACJ após o tratamento



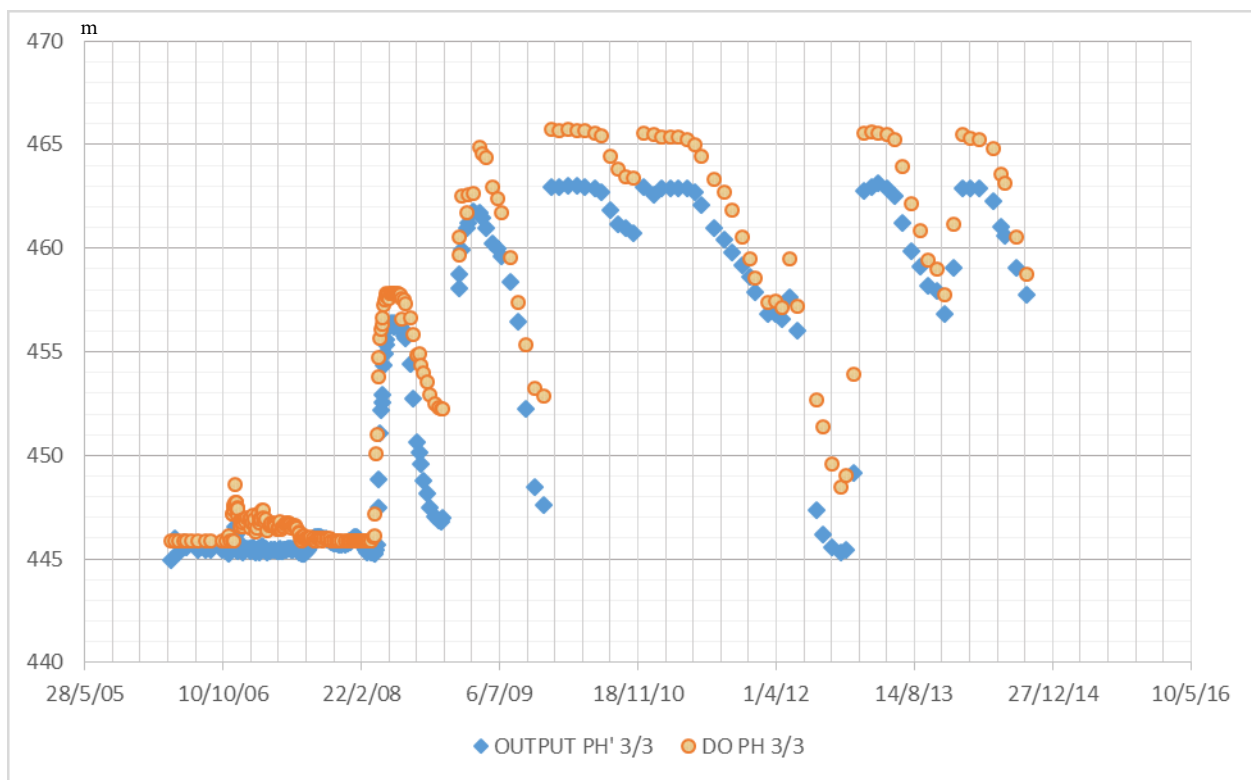
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 6/5 – ACJ após o tratamento



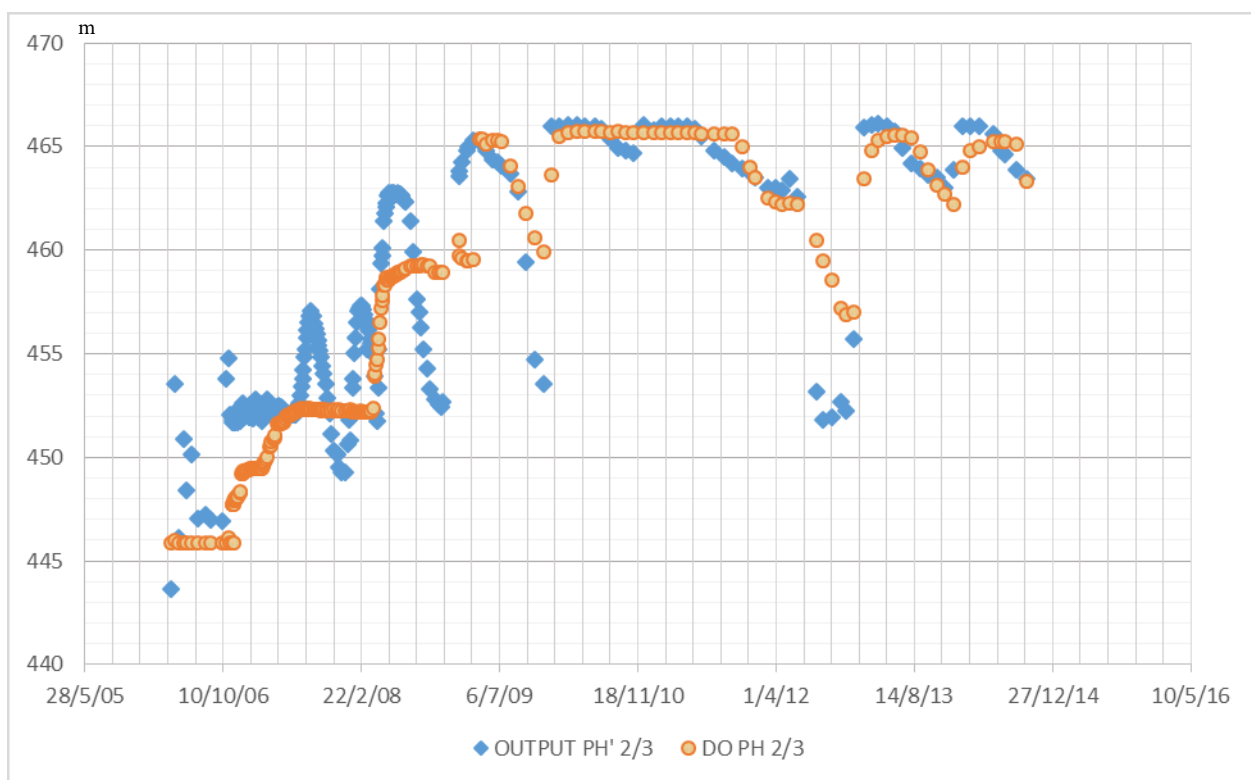
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 3/4 – ACM



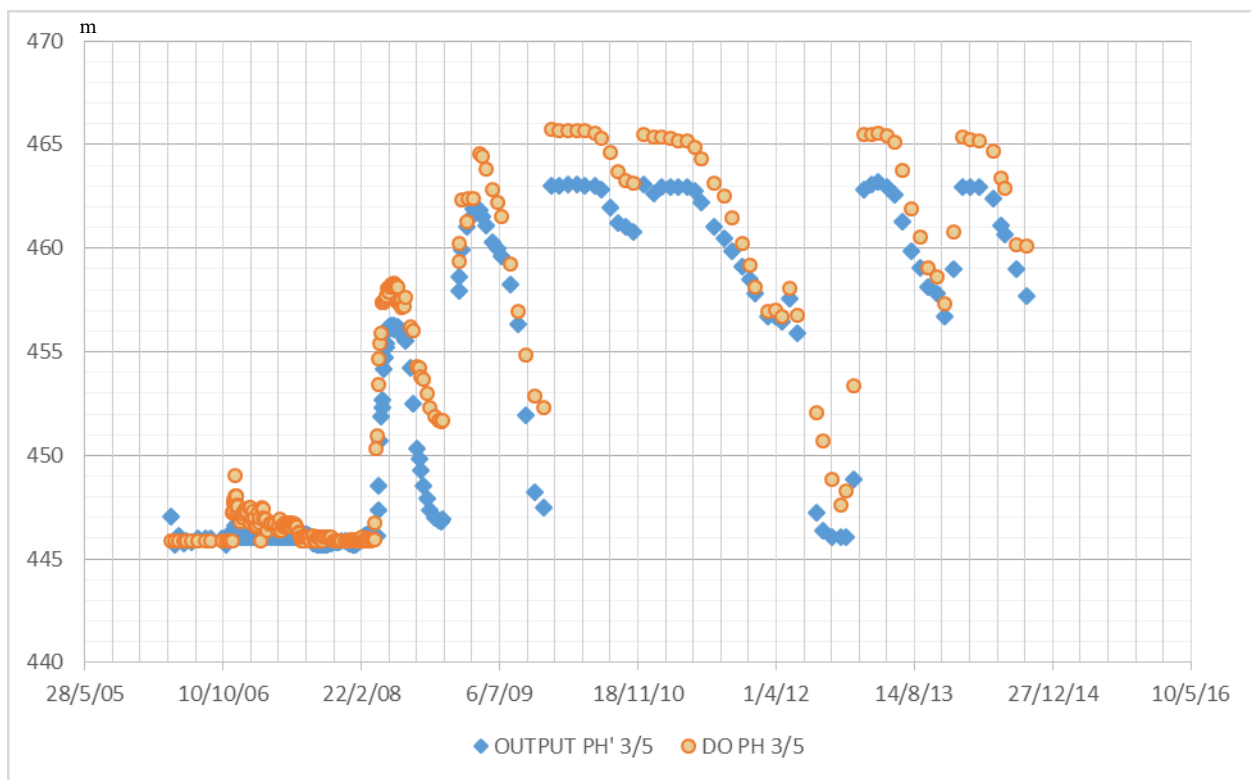
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 2/4 – ACM



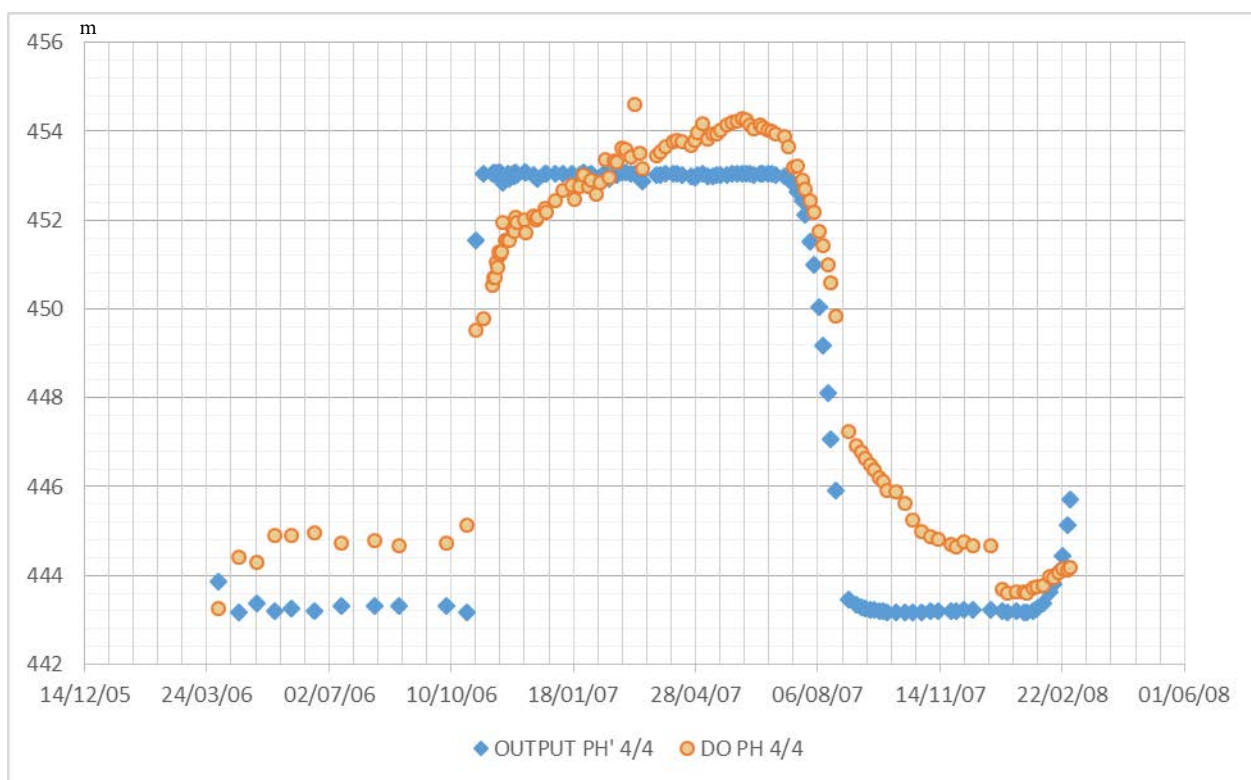
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 3/3 – ACM



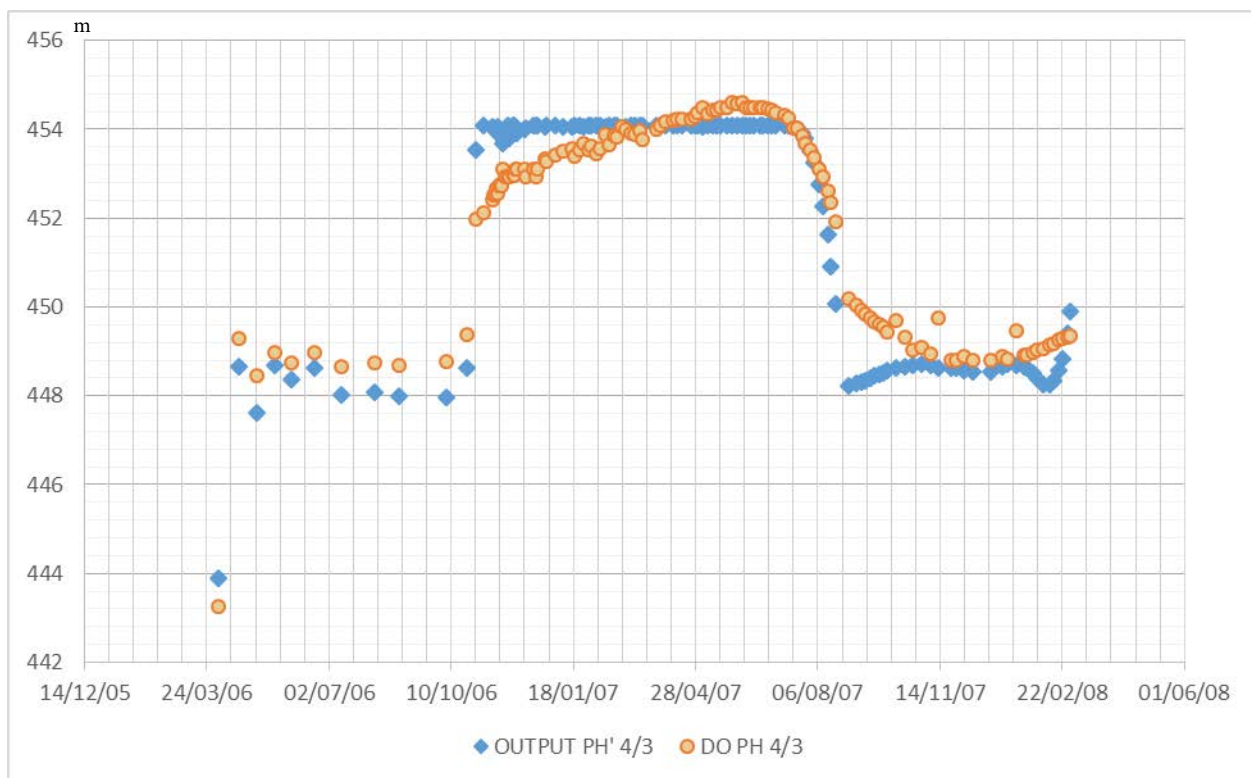
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 2/3 – ACM



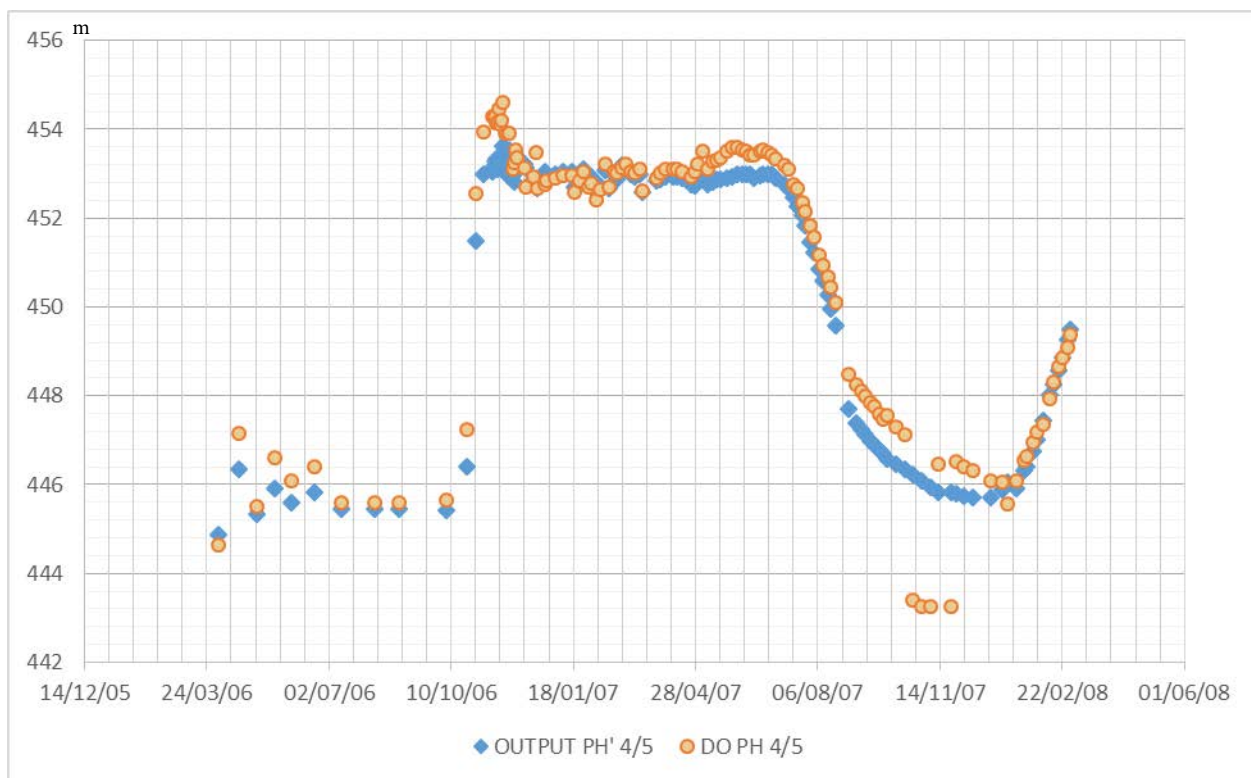
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 3/5 – ACM



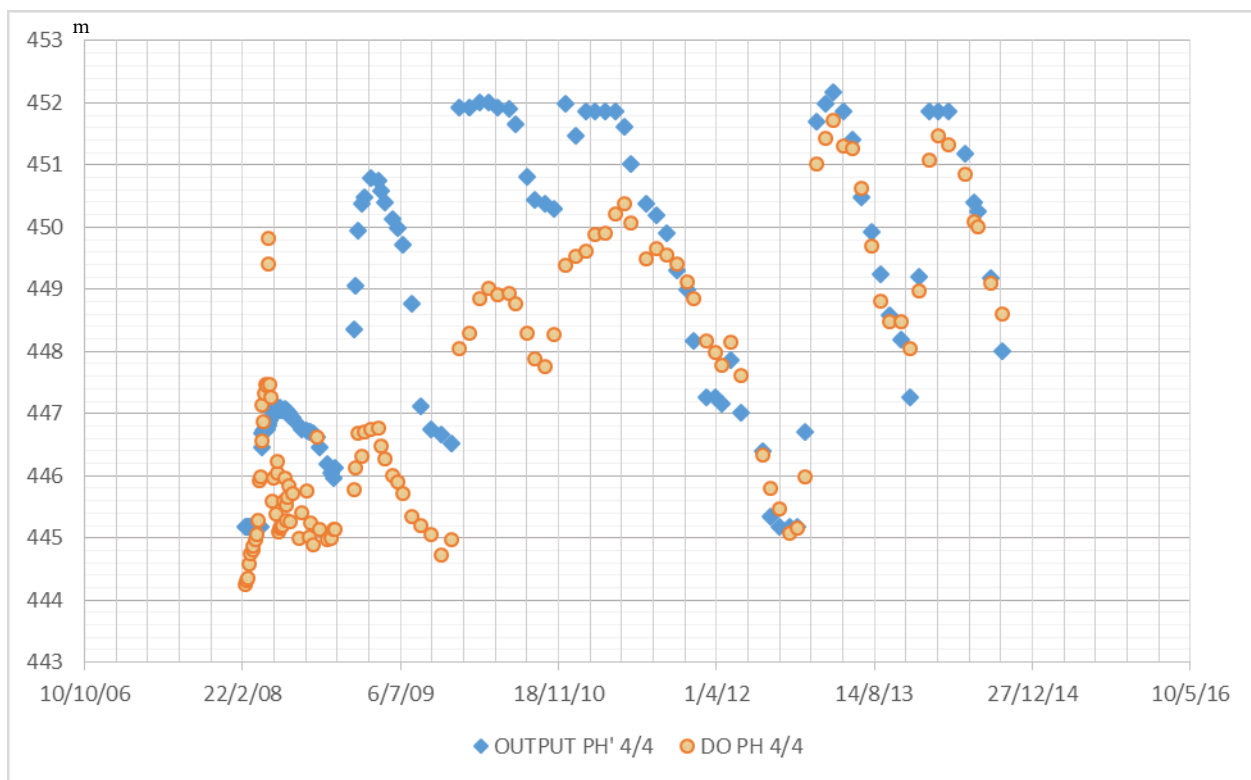
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 4/4 – FCJ até ao tratamento



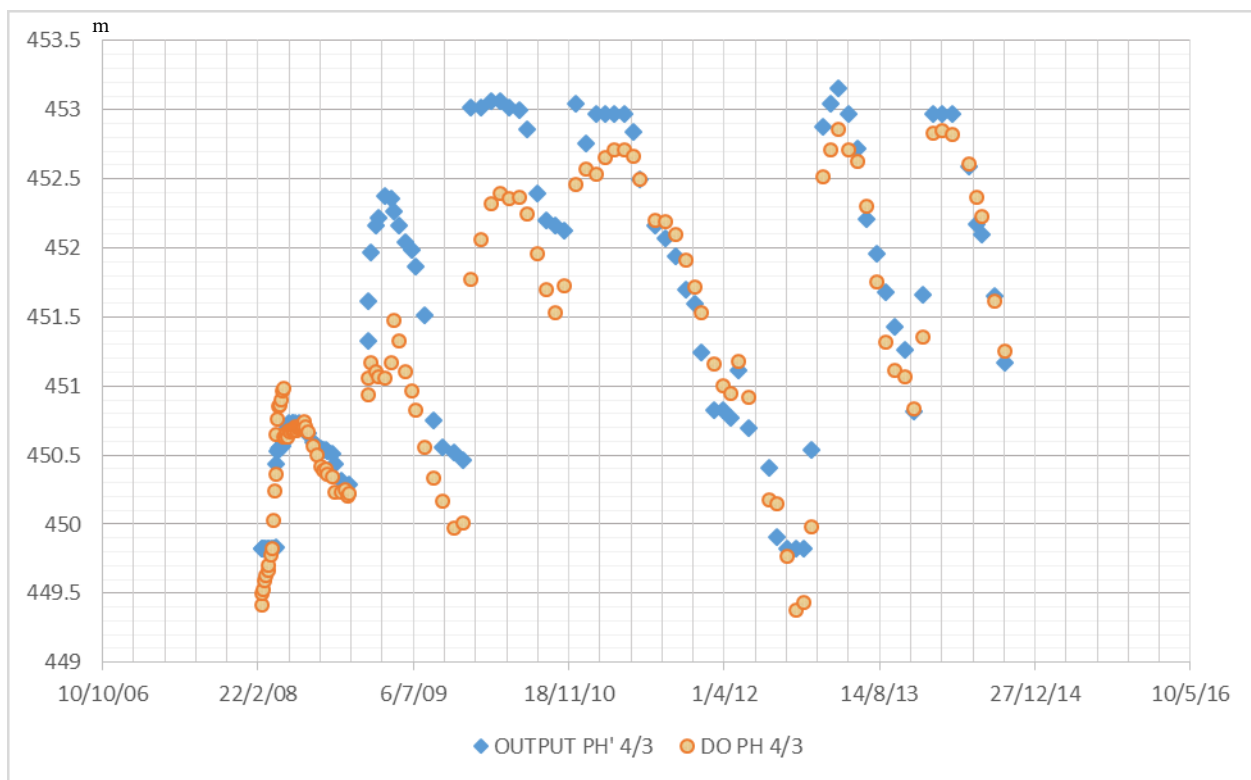
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 4/3 – FCJ até ao tratamento



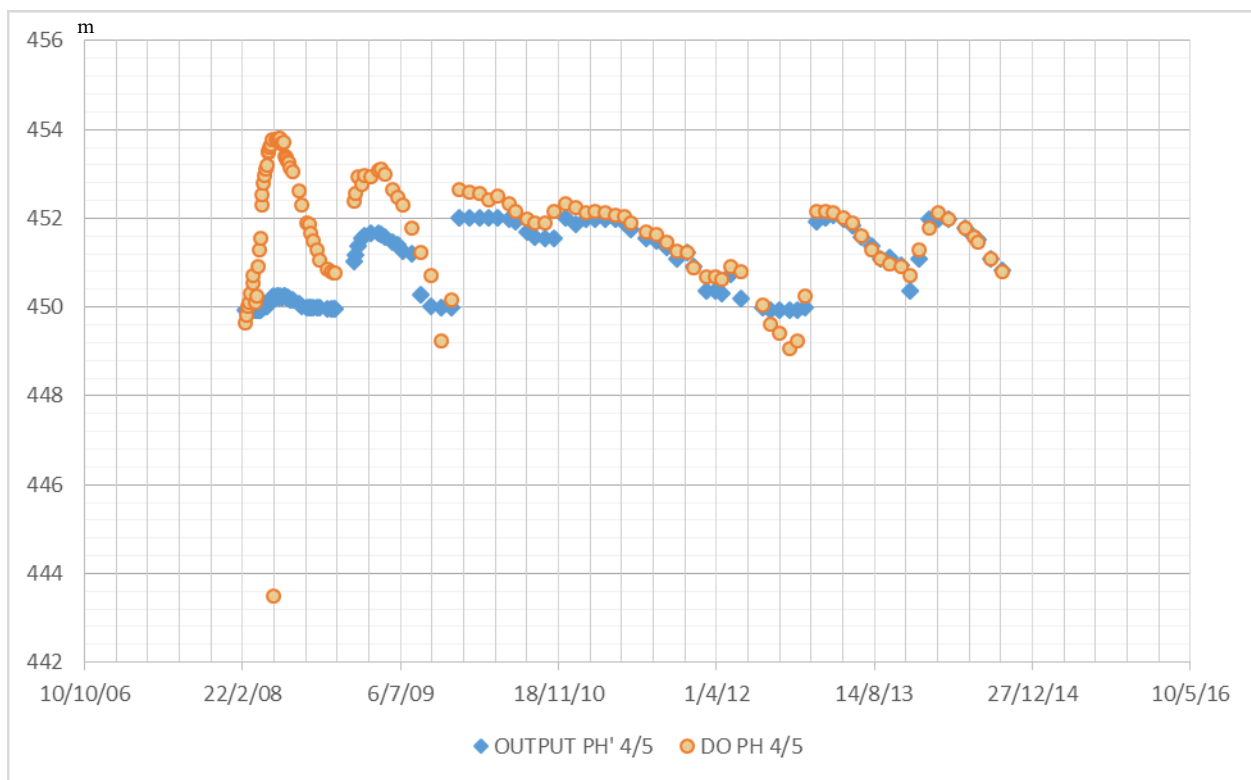
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 4/5 – FCJ até ao tratamento



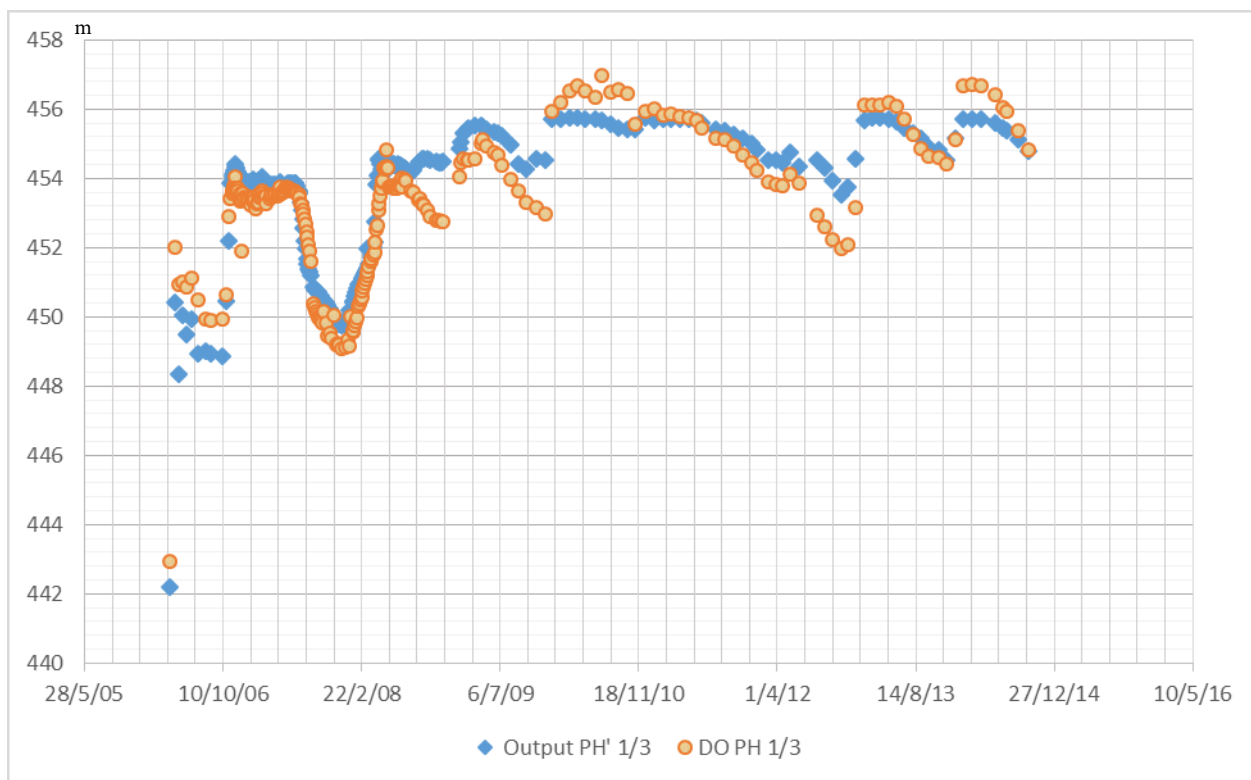
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 4/4 – FCJ após o tratamento



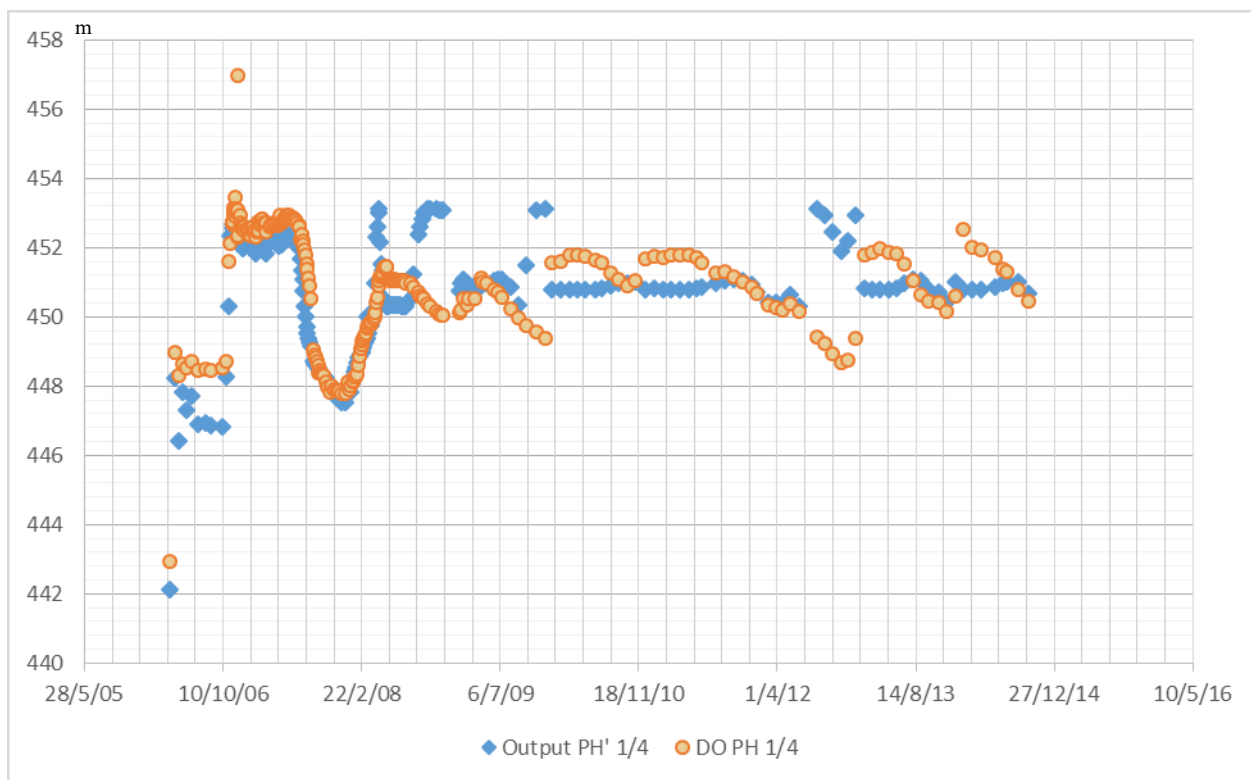
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 4/3 – FCJ após o tratamento



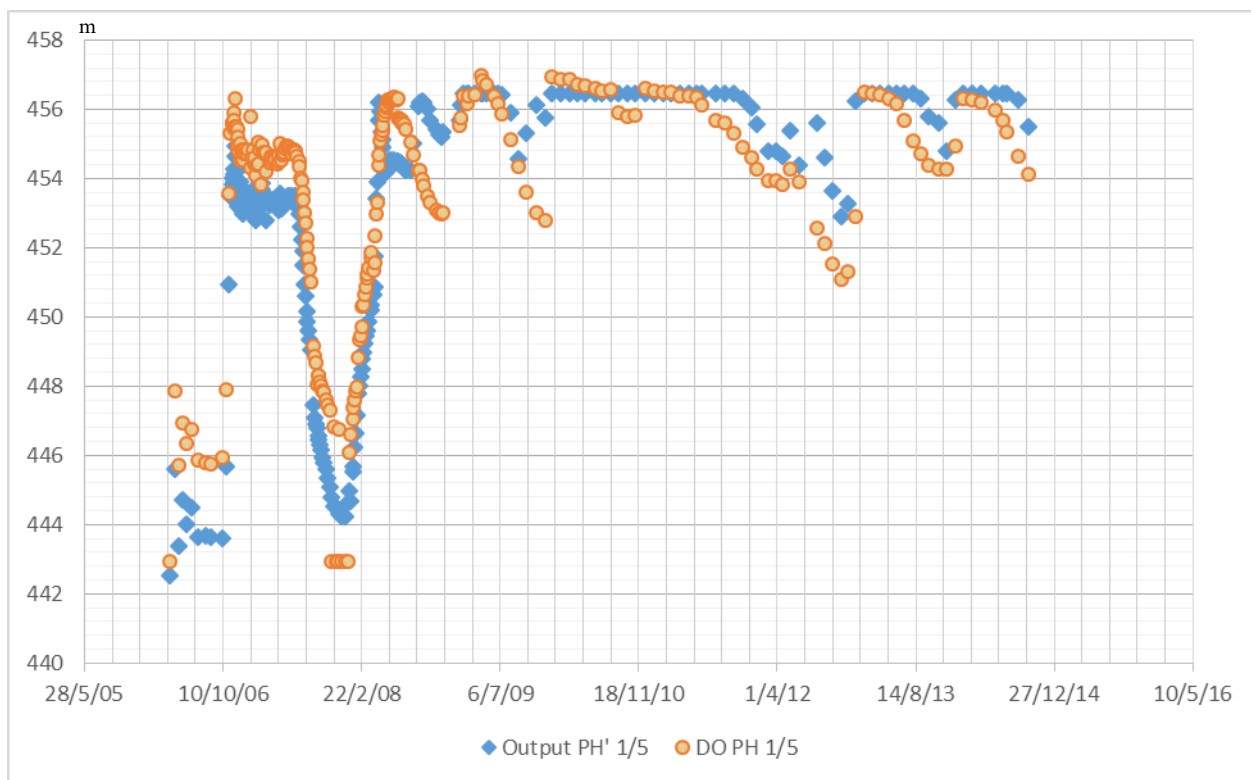
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 4/5 – FCJ após o tratamento



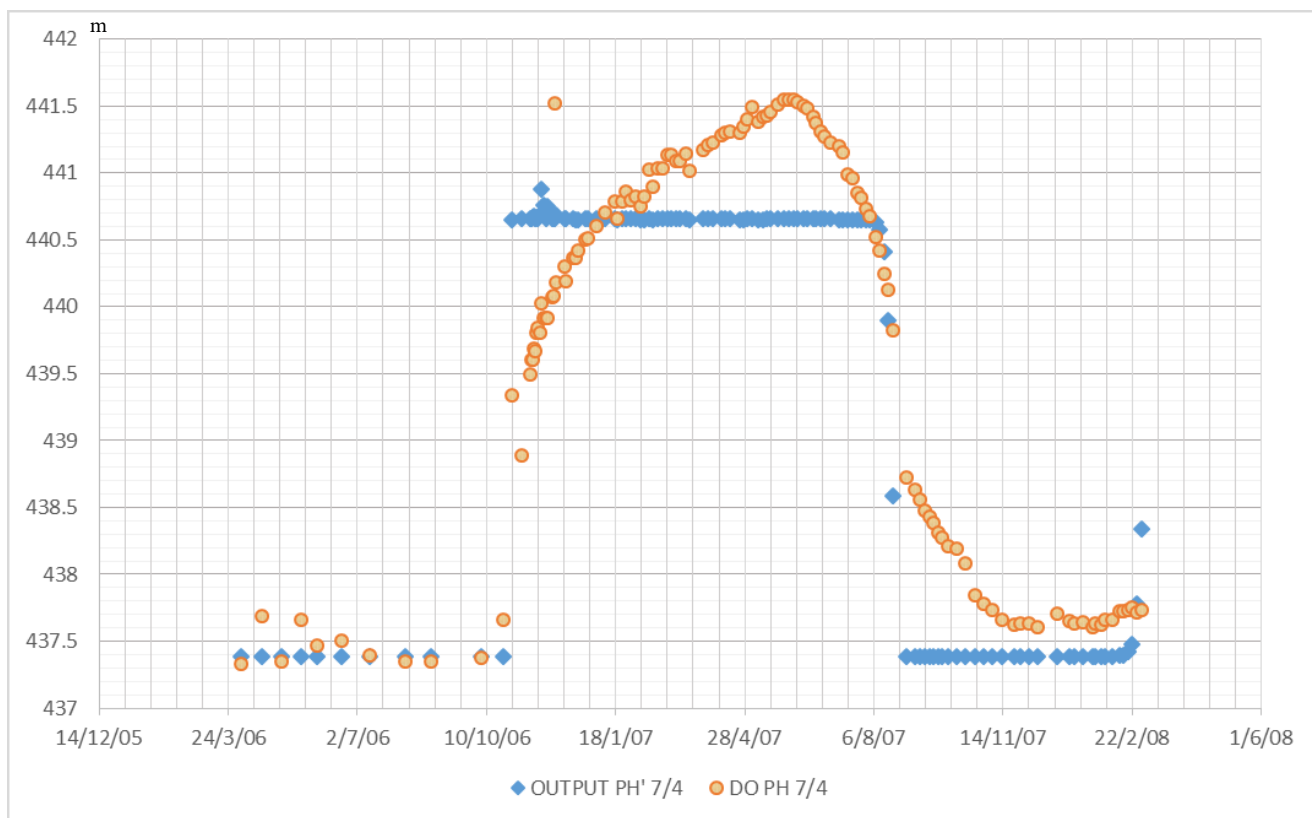
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 1/3 – FCM



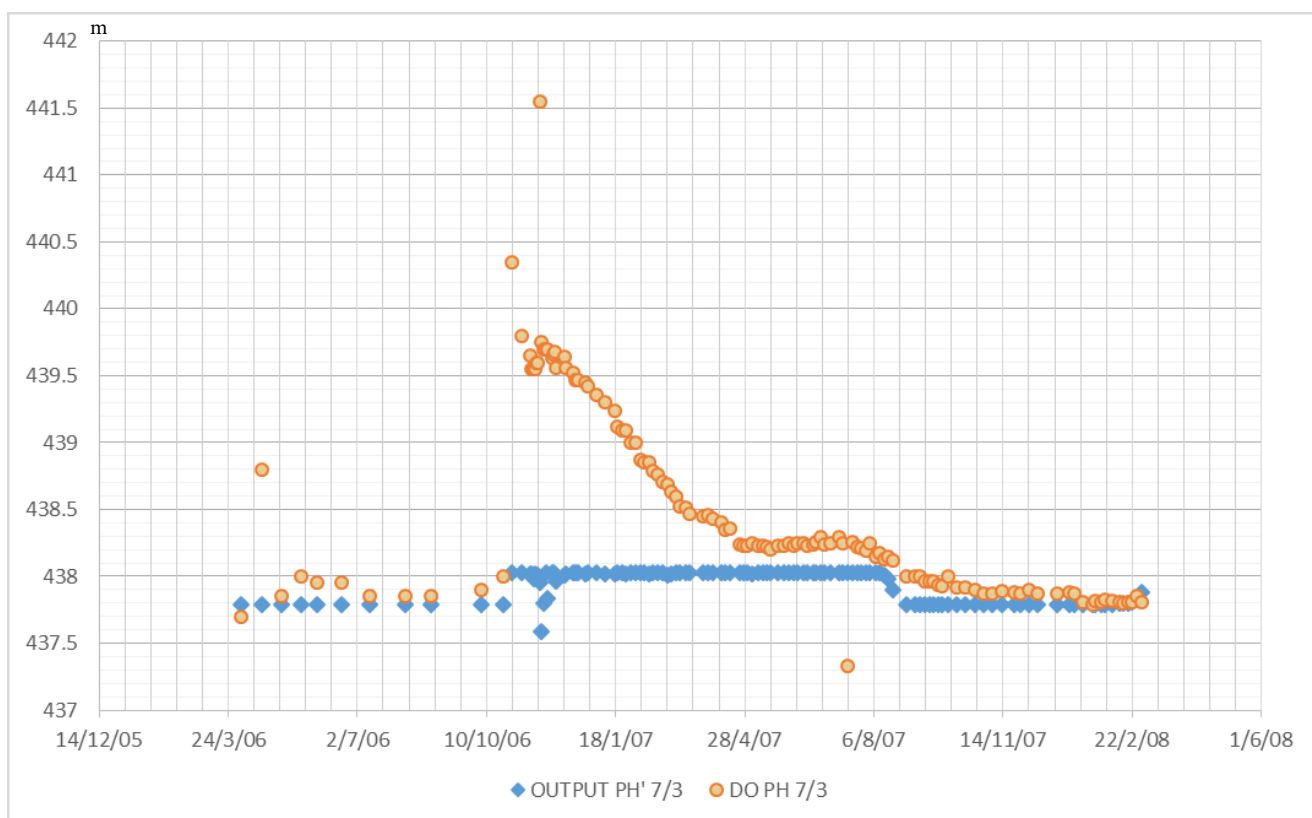
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 1/4 – FCM



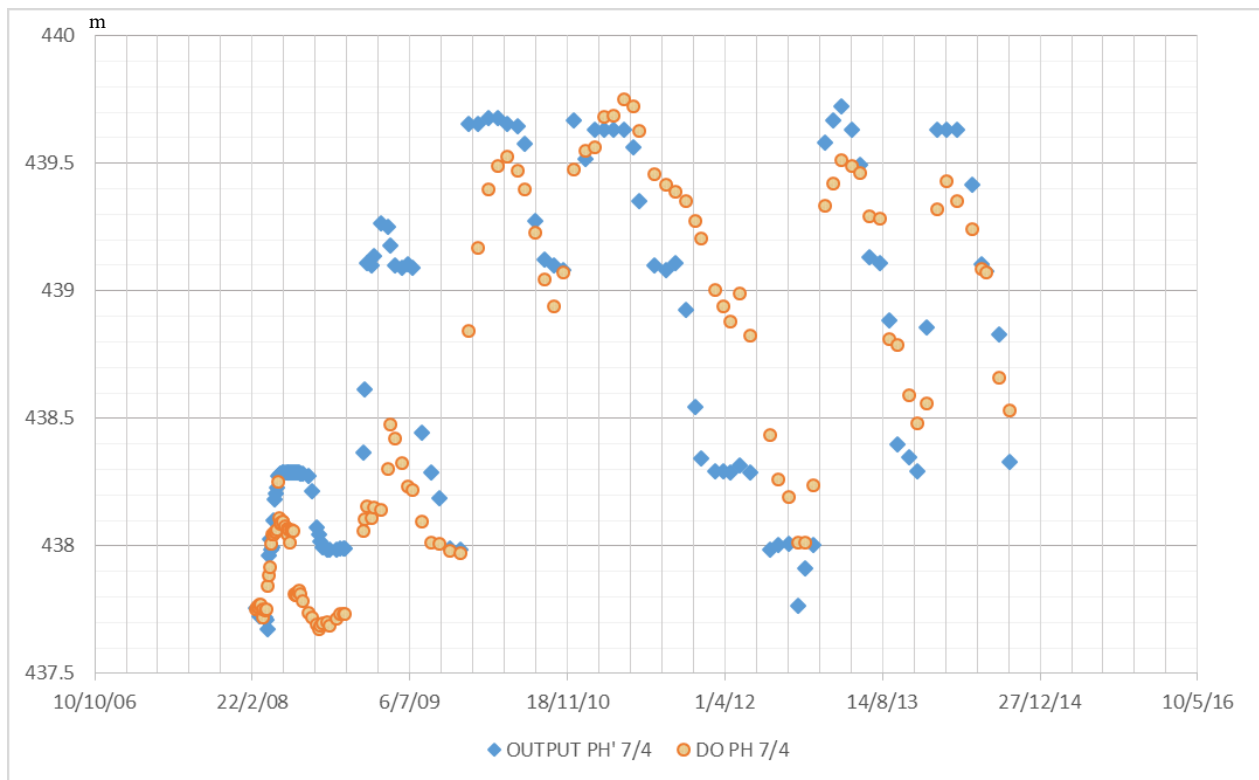
Output versus Desired Output - DO para o piezómetro PH 1/5 – FCM



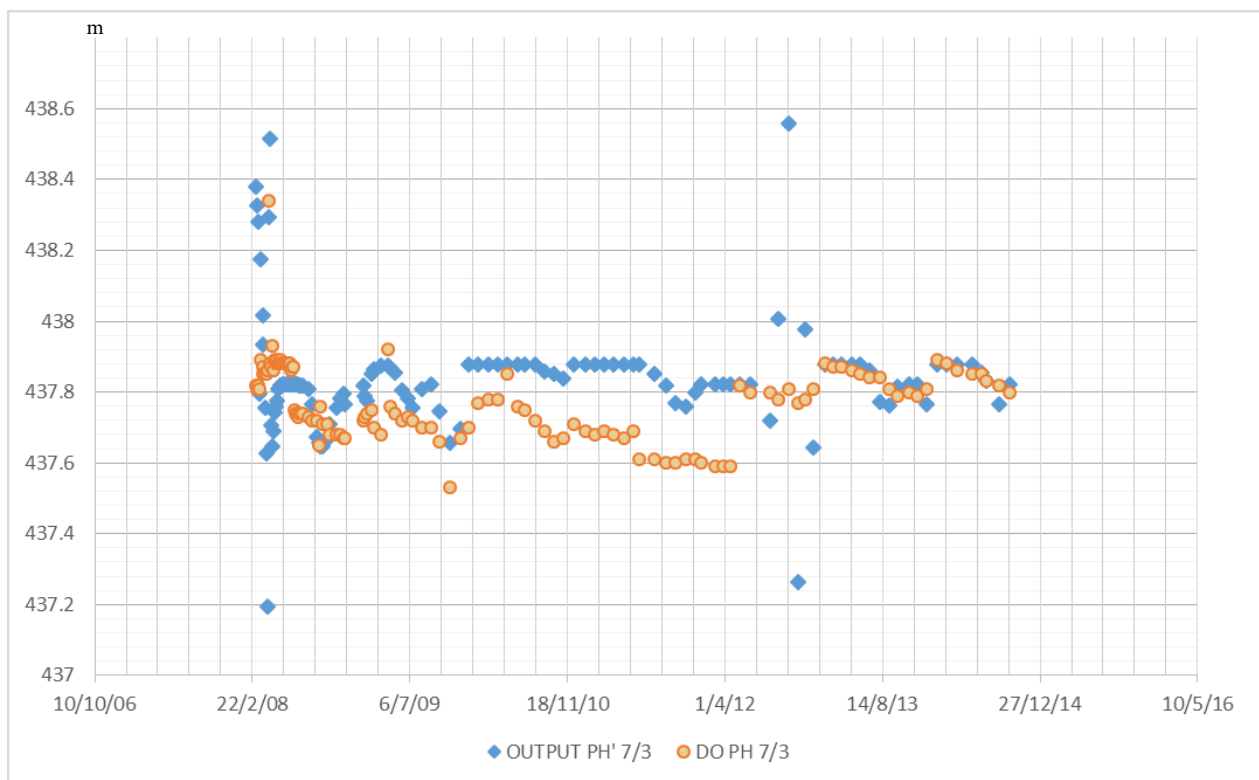
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 7/4 – FB – até ao tratamento



Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 7/3 – FB – até ao tratamento



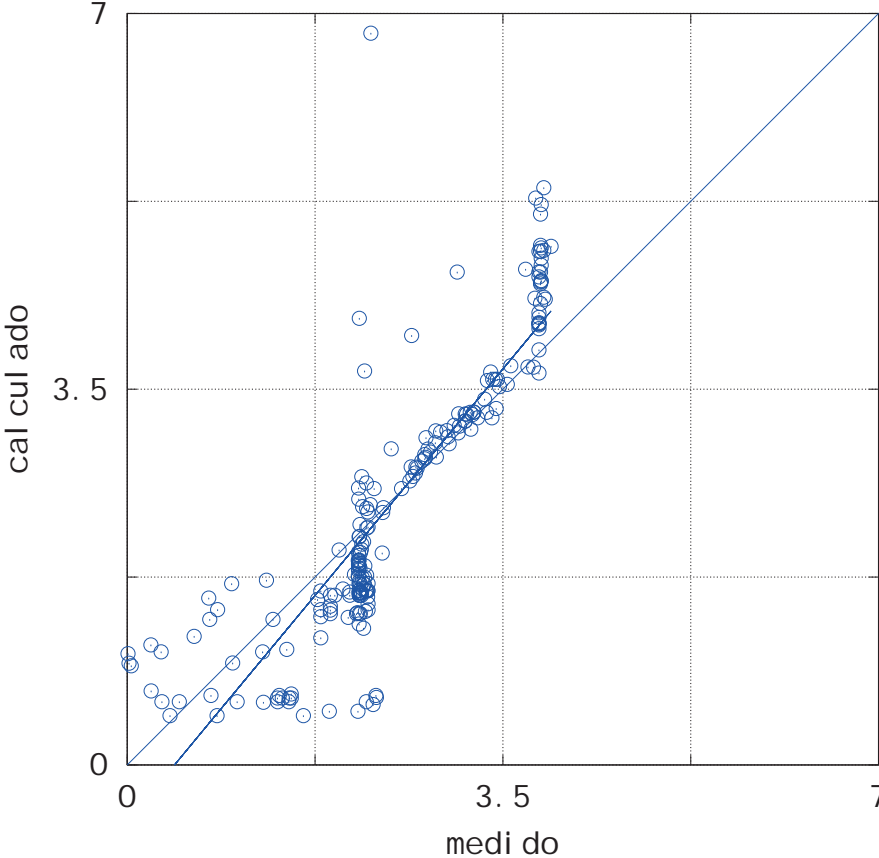
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 7/4 – FB – após o tratamento



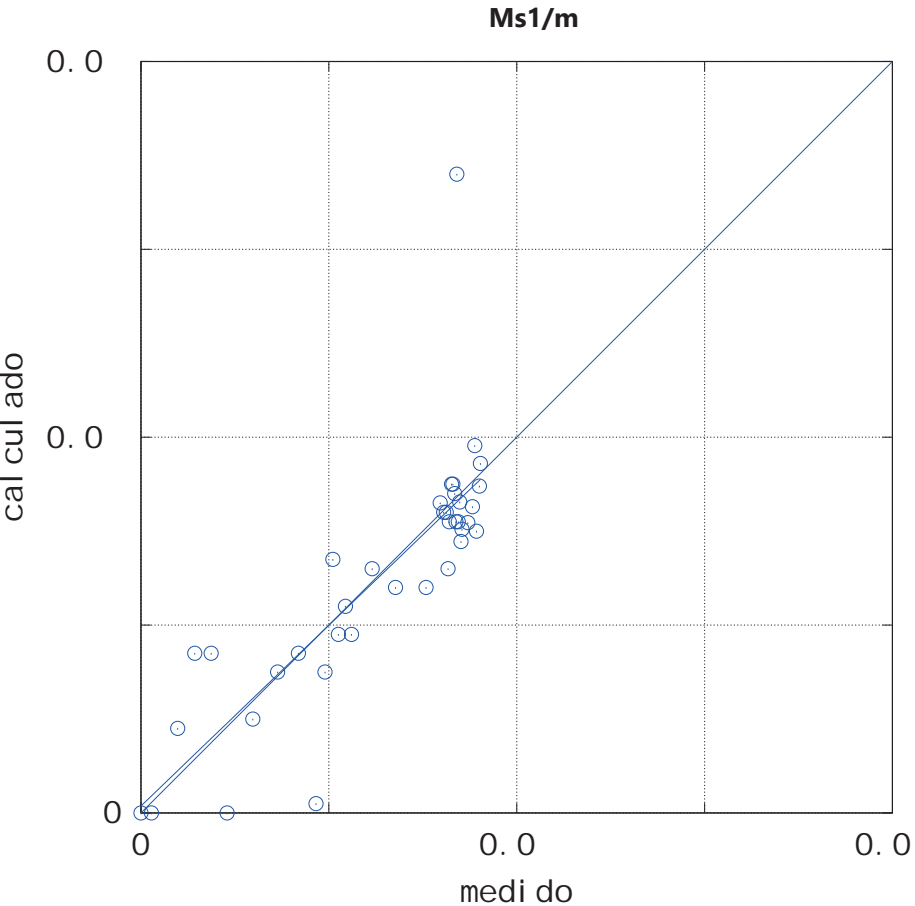
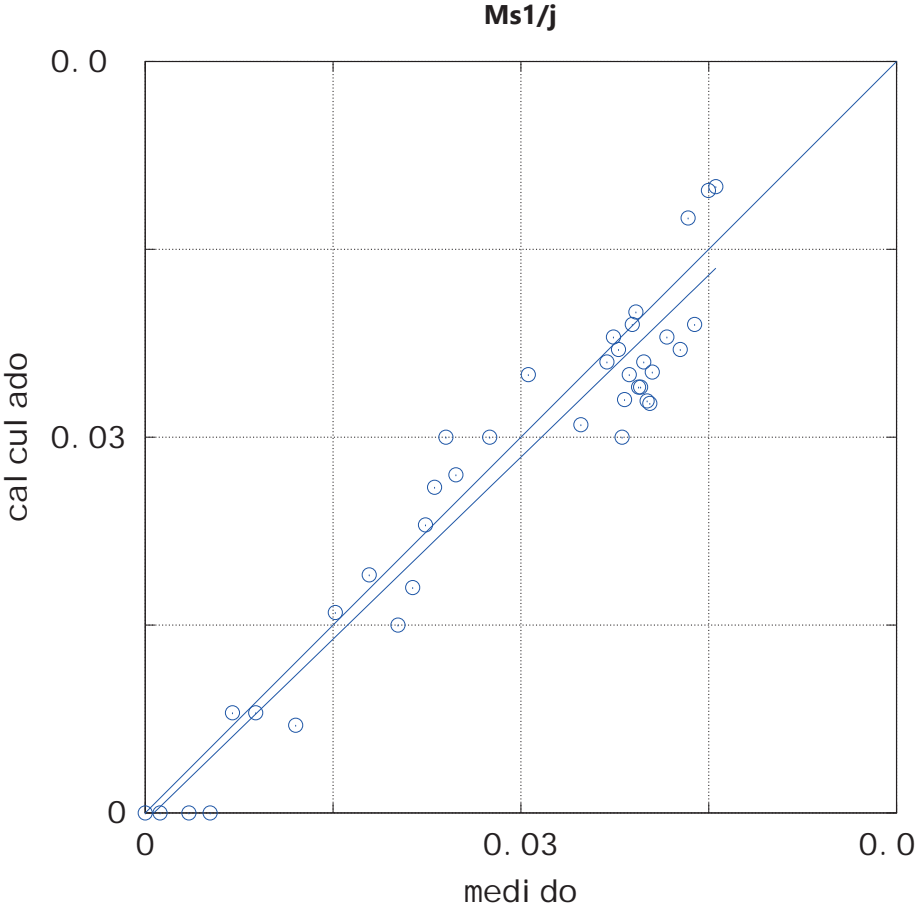
Output versus Desired Output - DO para o piezômetro PH 7/3 – FB após o tratamento

ANEXO IV - Comparação entre valores medidos e valores calculados através dos gráficos de dispersão

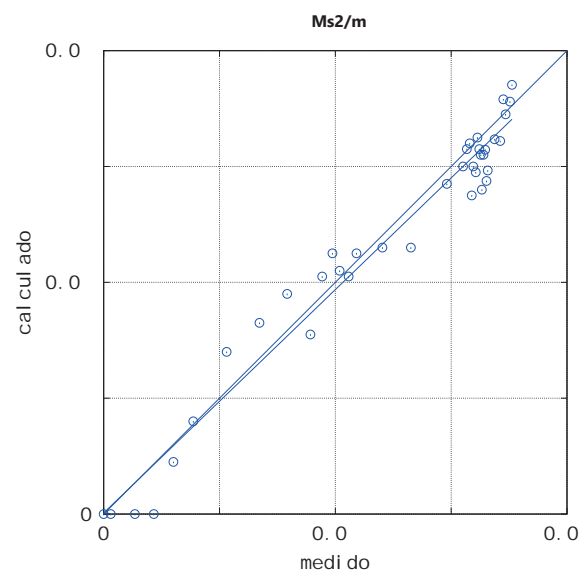
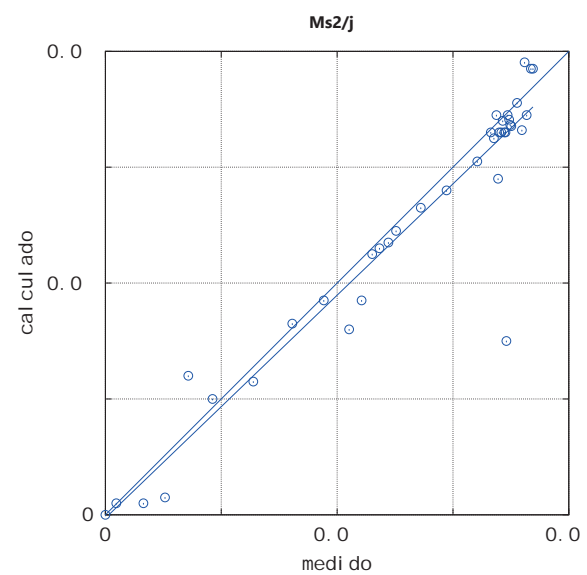
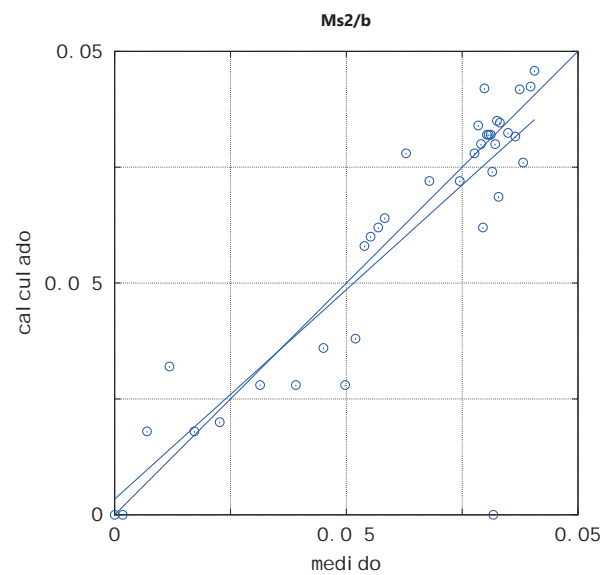
Caudais



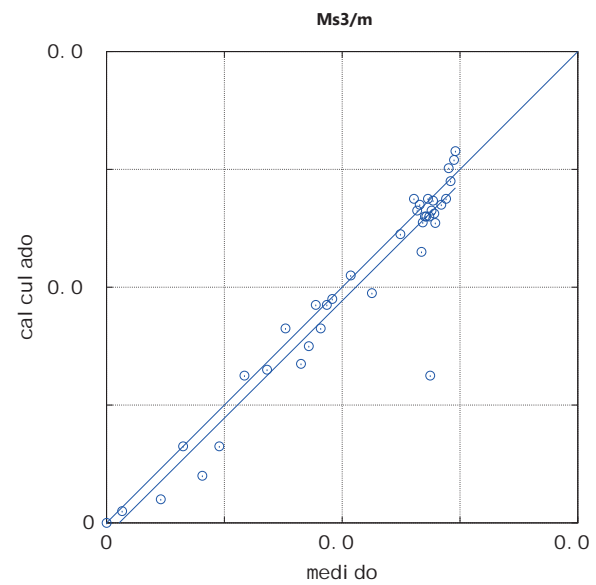
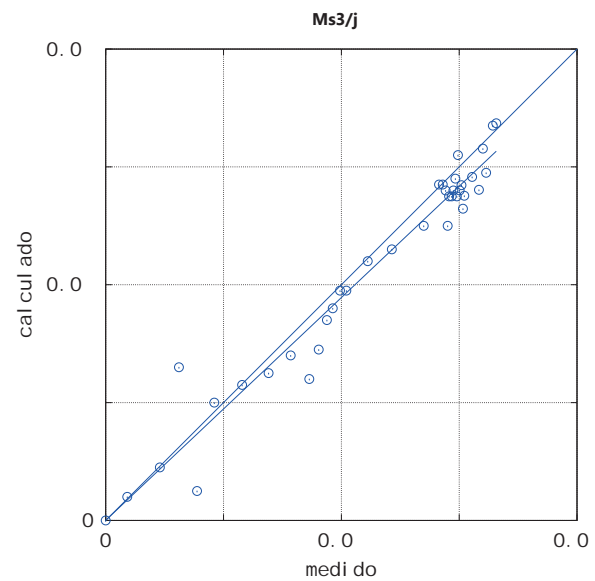
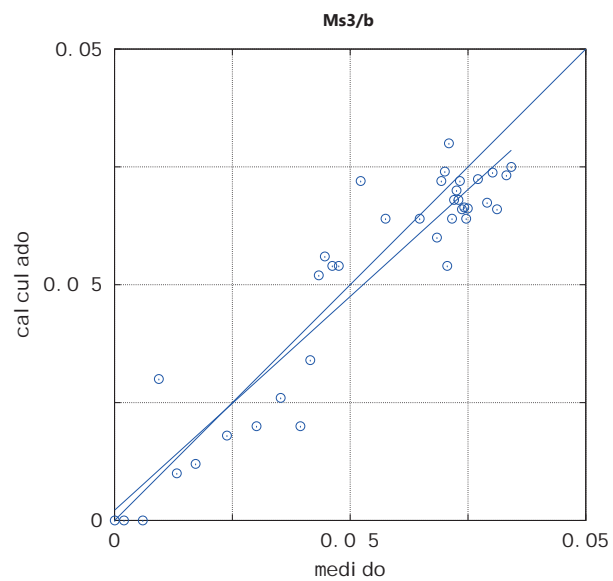
Marcas superficiais



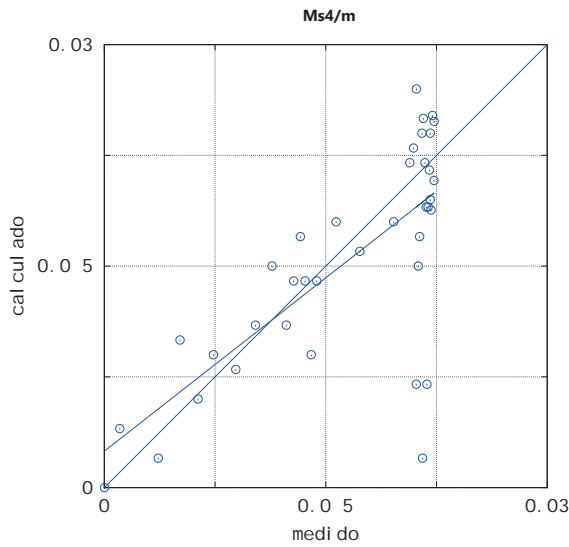
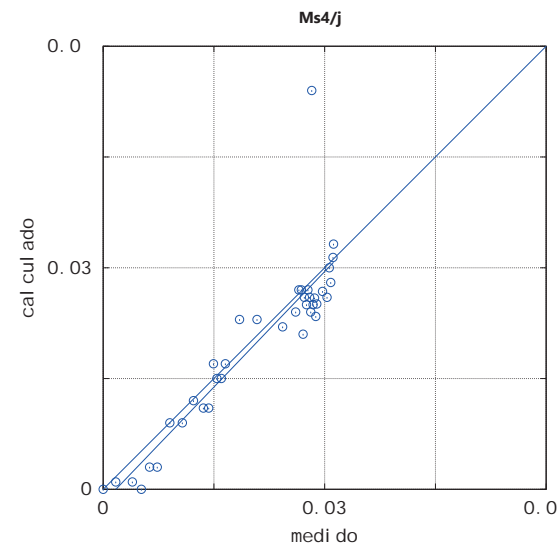
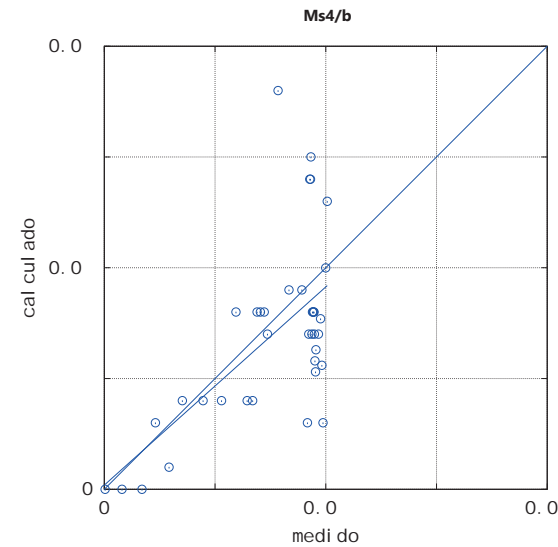
Marcas superficiais



Marcas superficiais

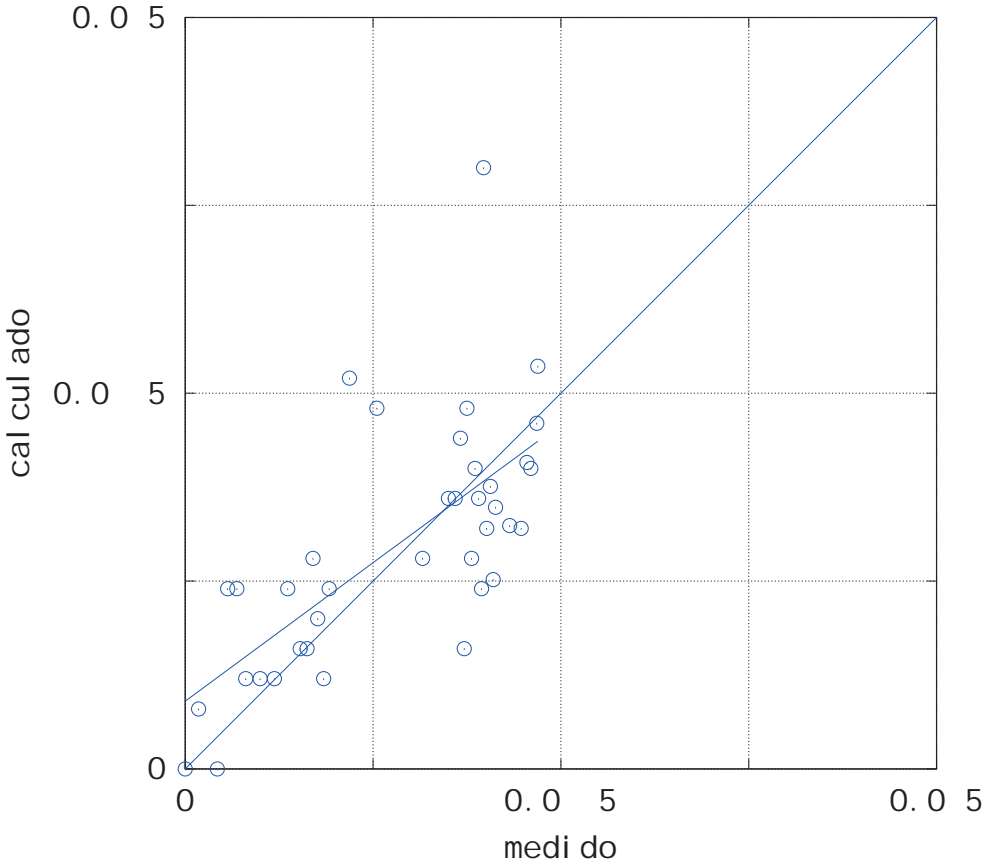


Marcas Superficiais

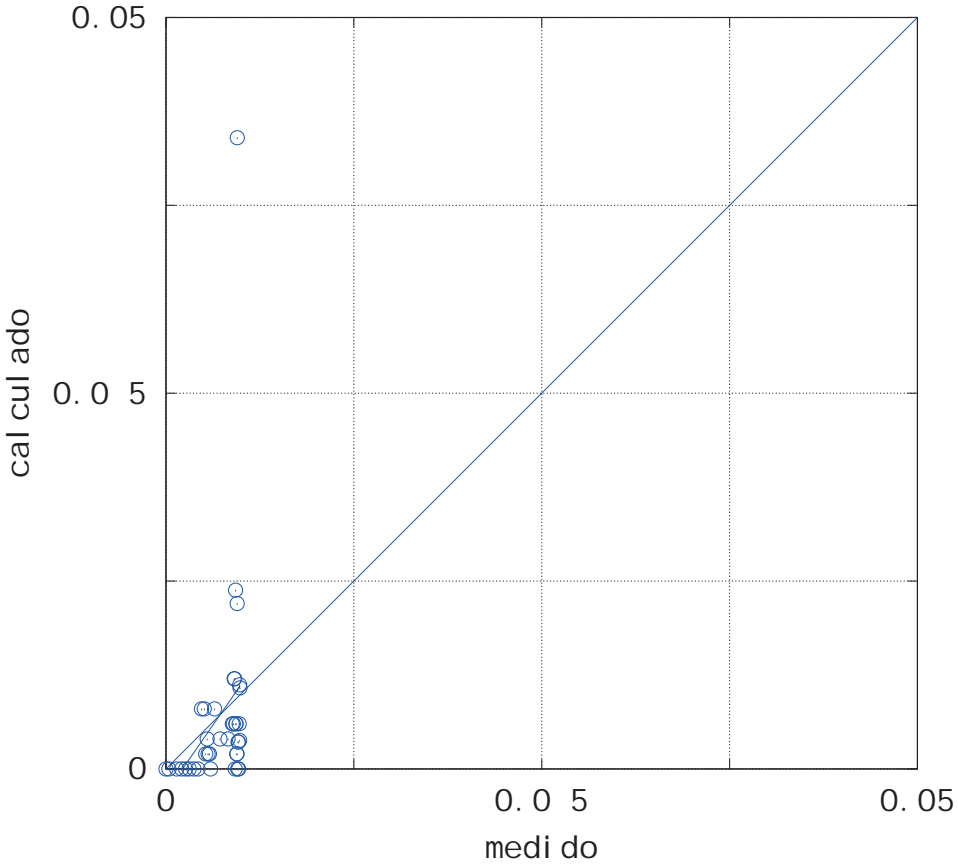


Marcas superficiais

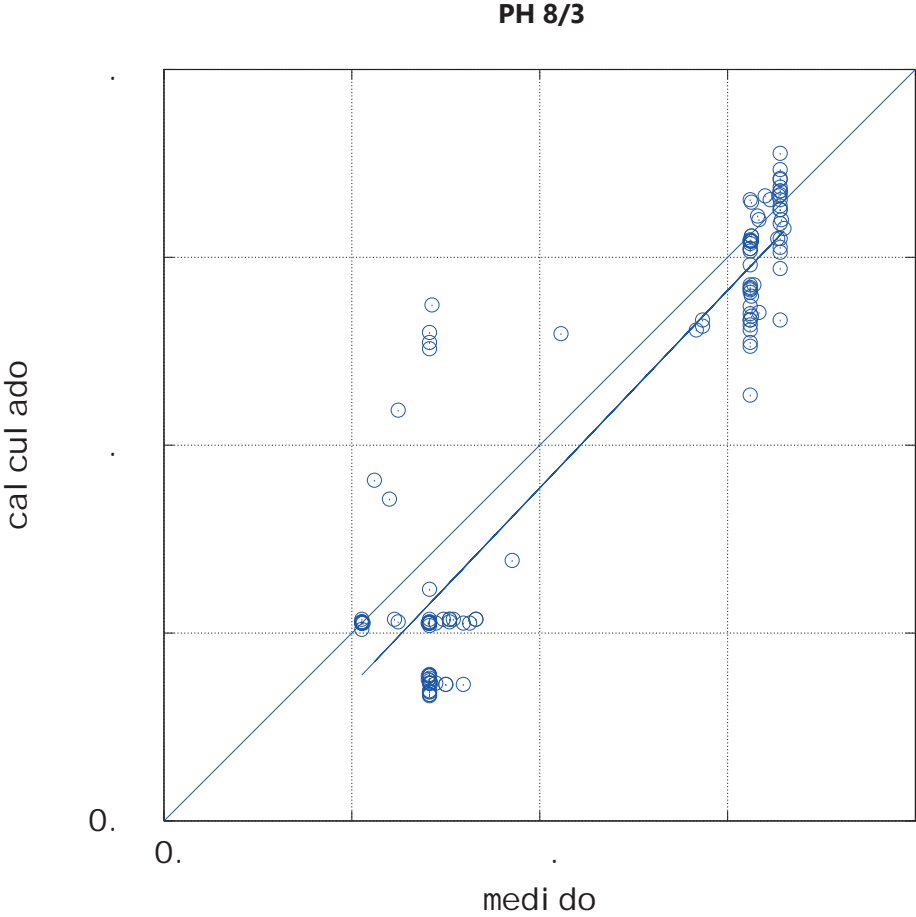
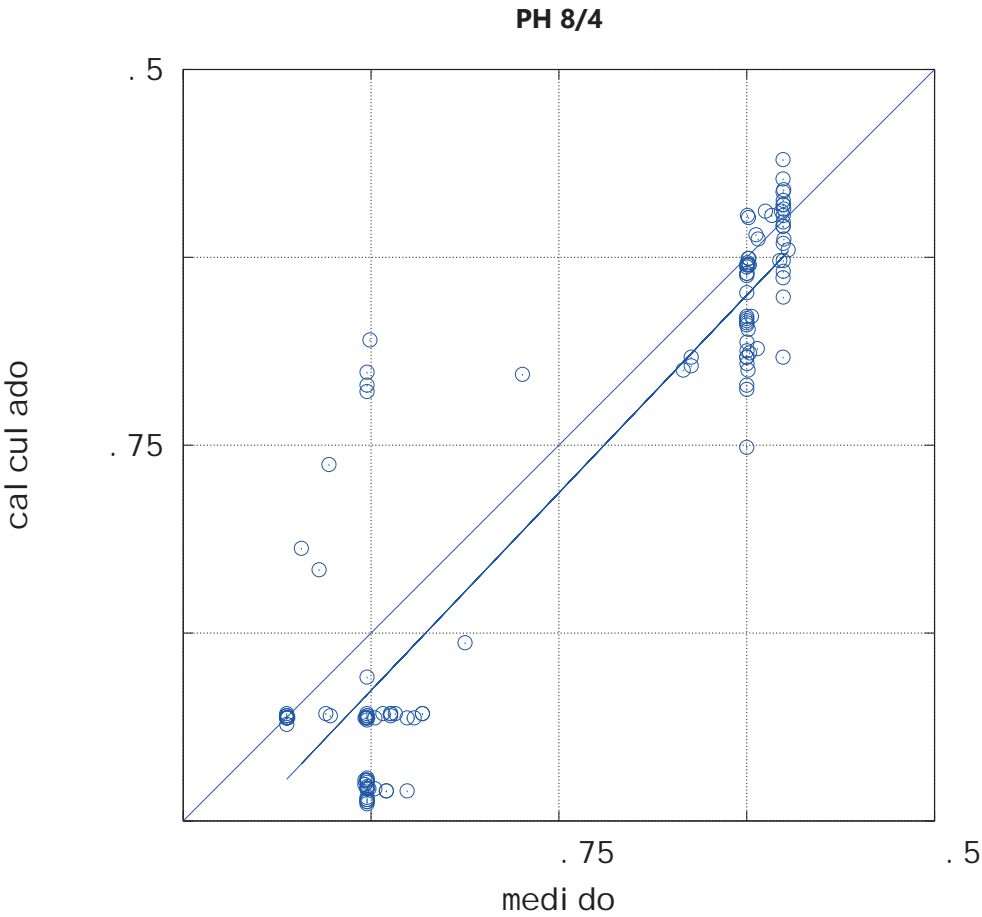
Ms5/j



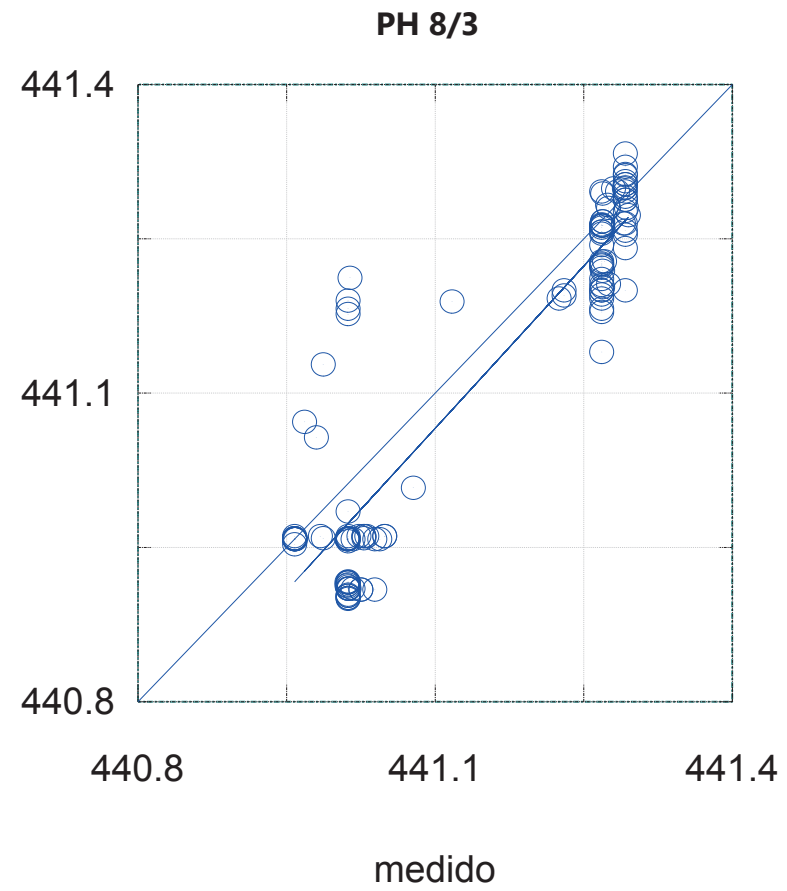
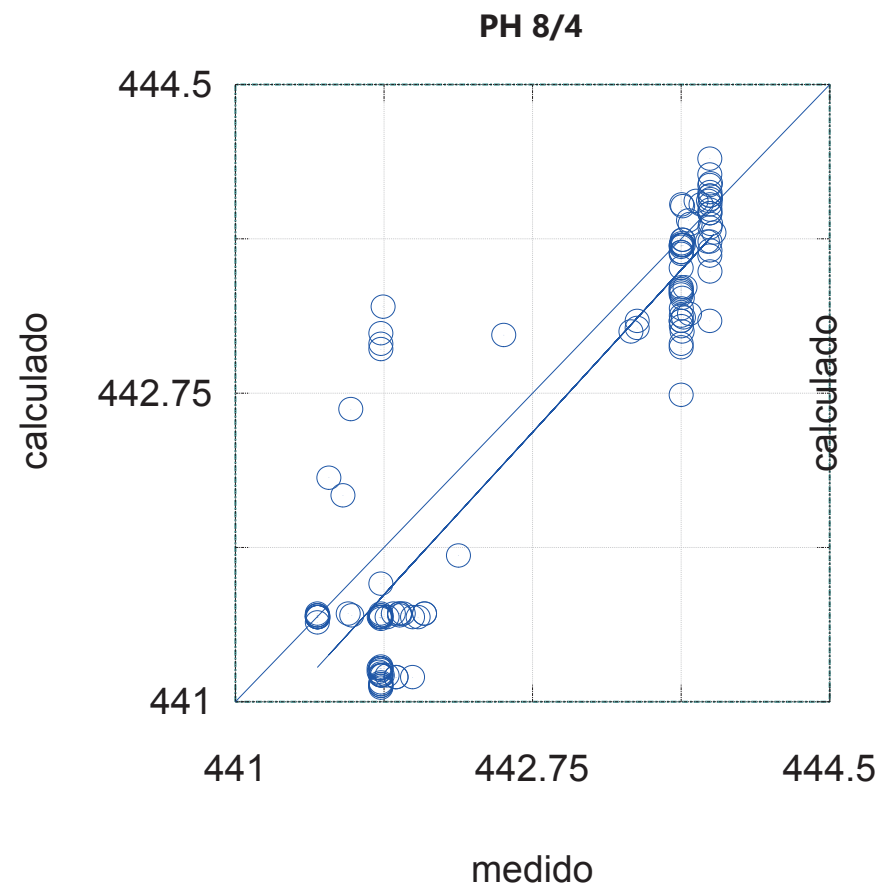
Ms5/m



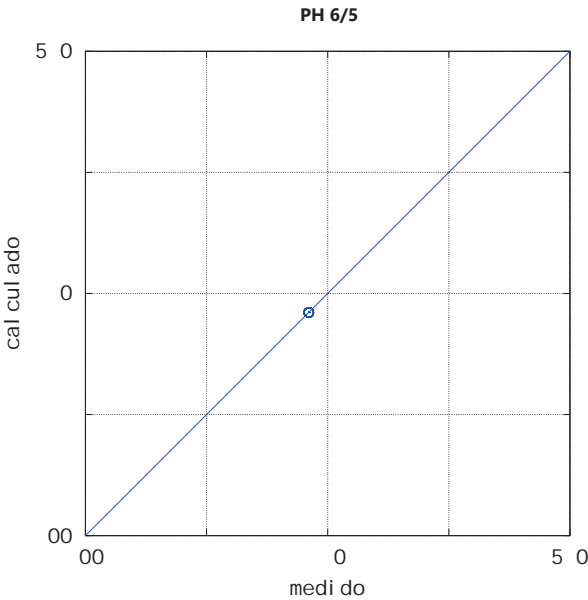
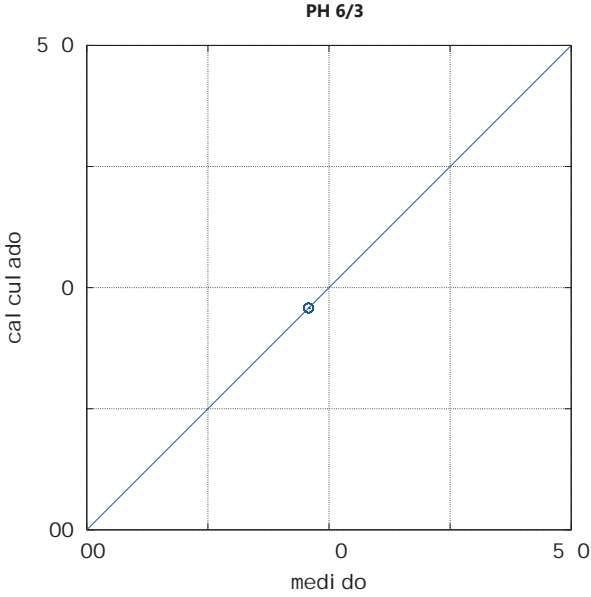
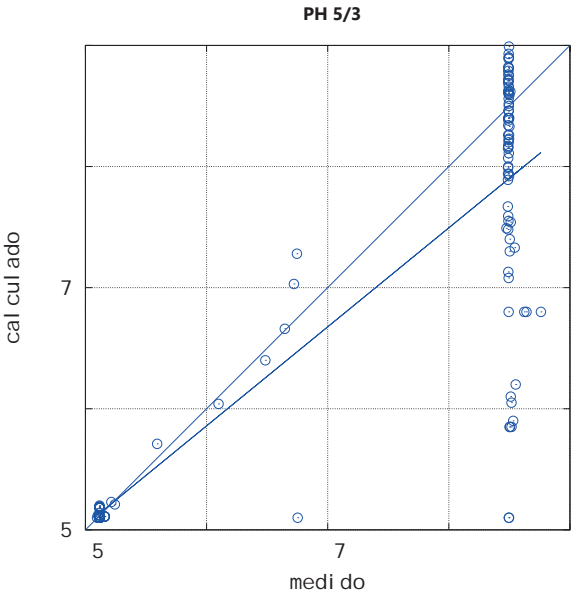
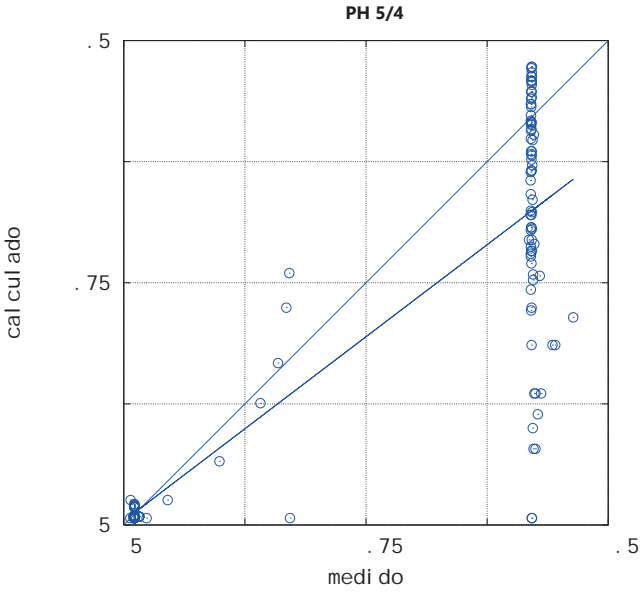
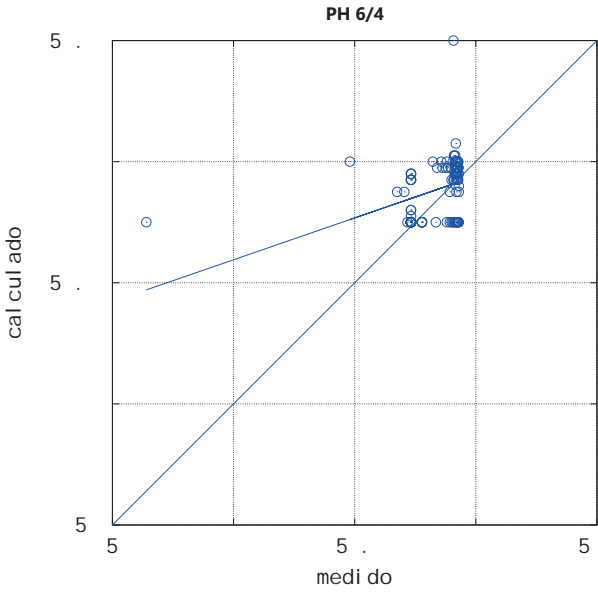
Piezómetros - AB até ao tratamento



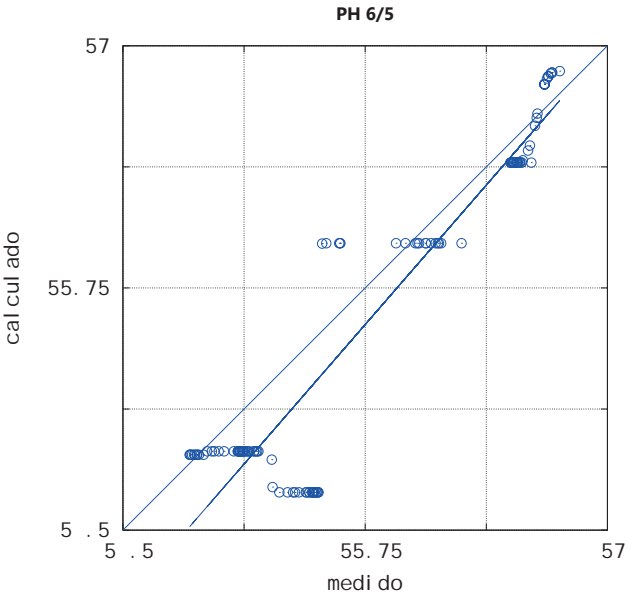
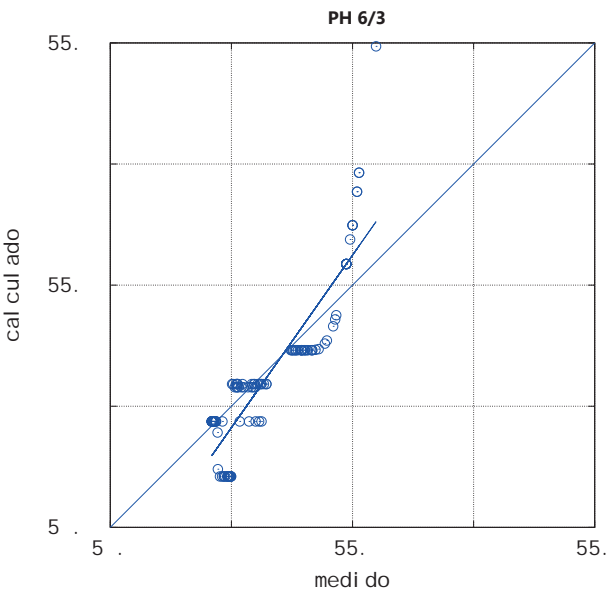
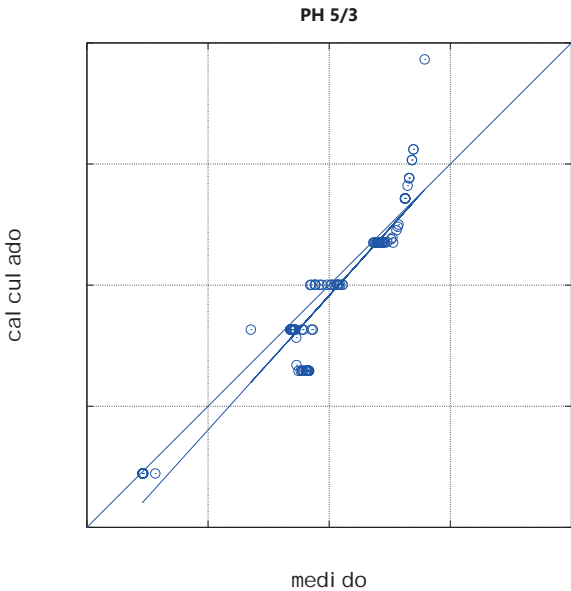
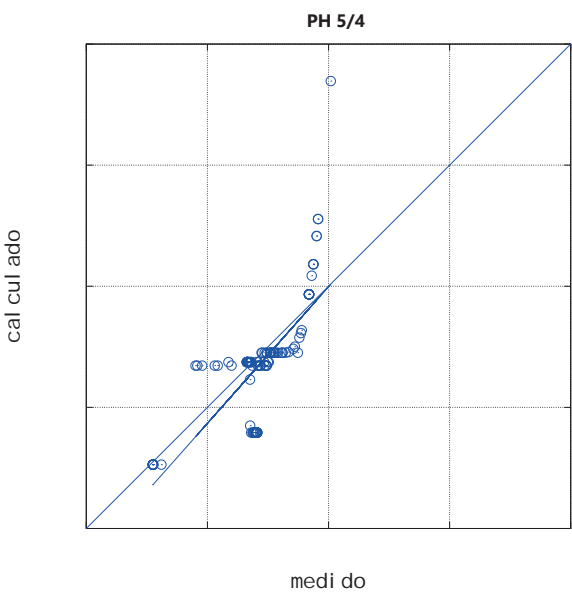
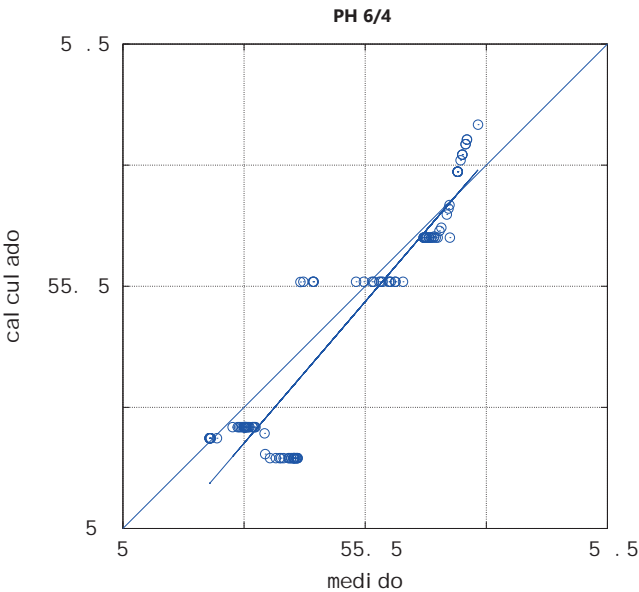
Piezómetros - AB após o tratamento

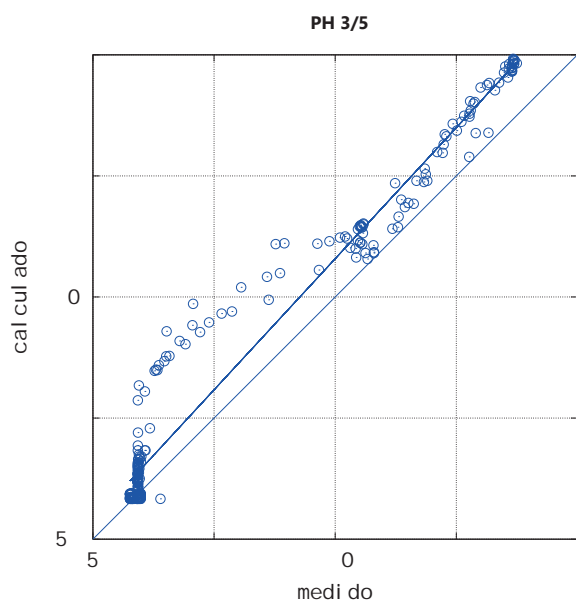
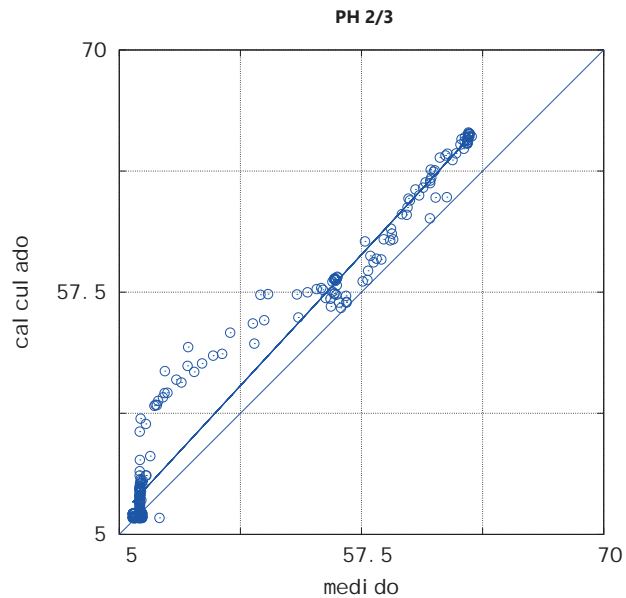
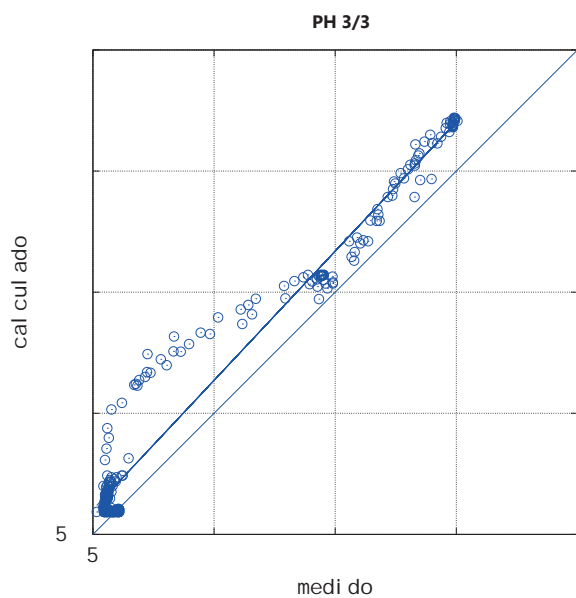
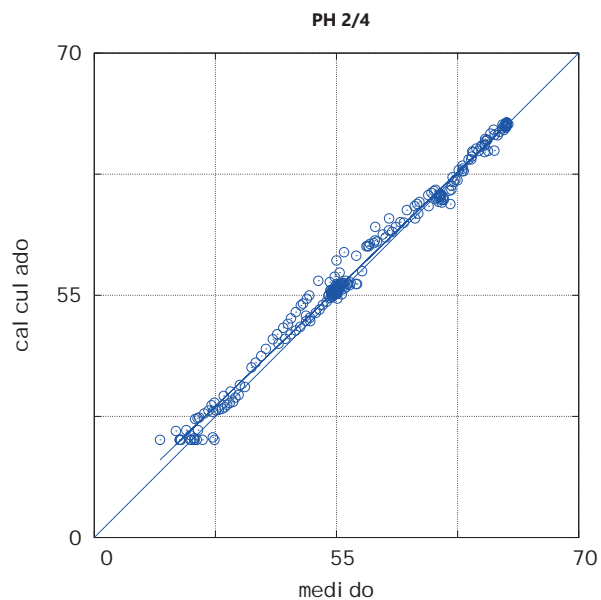
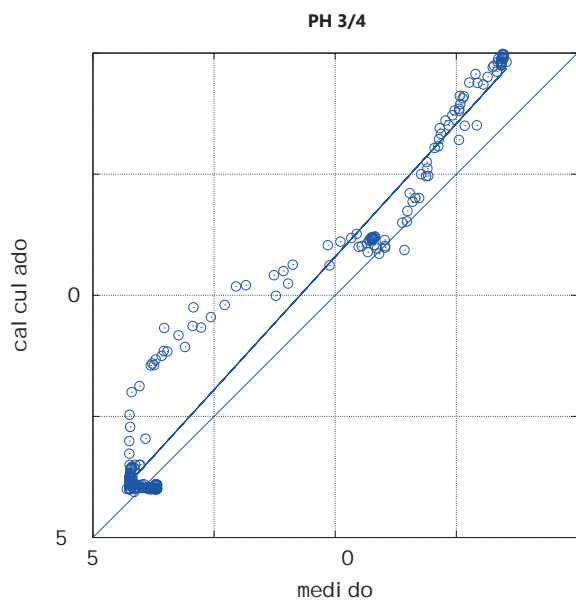


Piezómetros - ACJ até ao tratamento

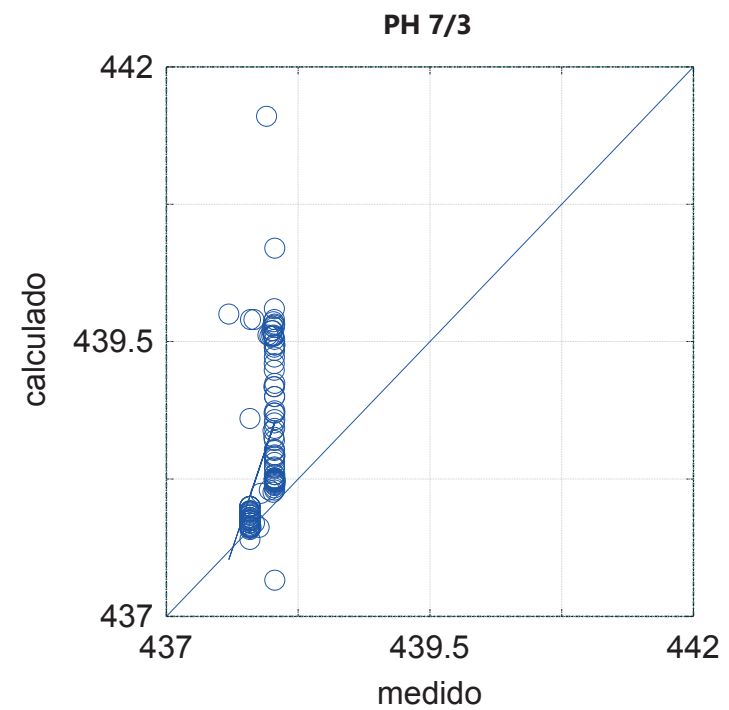
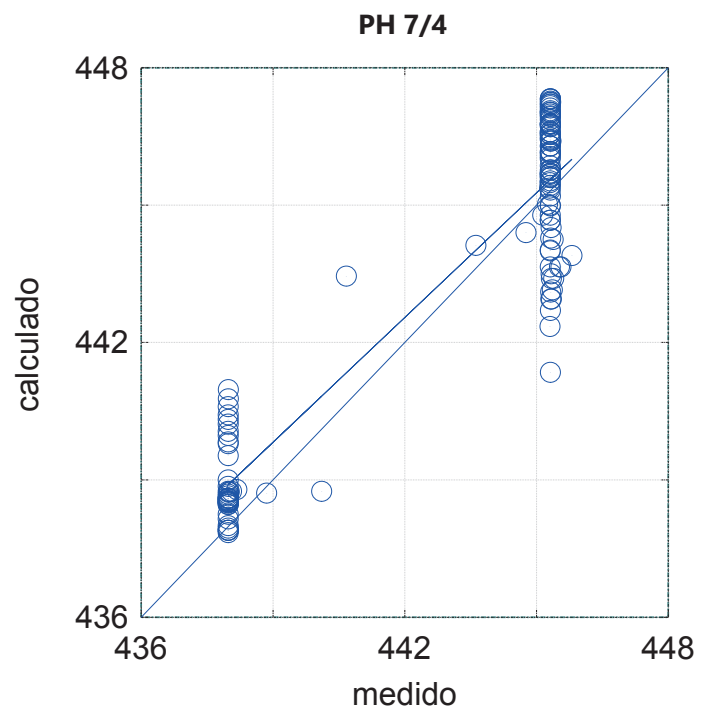


Piezômetros- ACJ após o tratamento

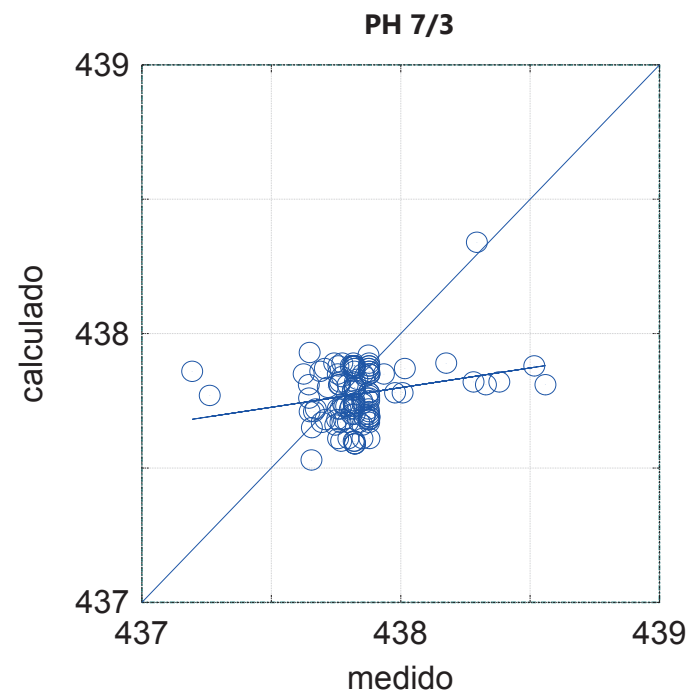
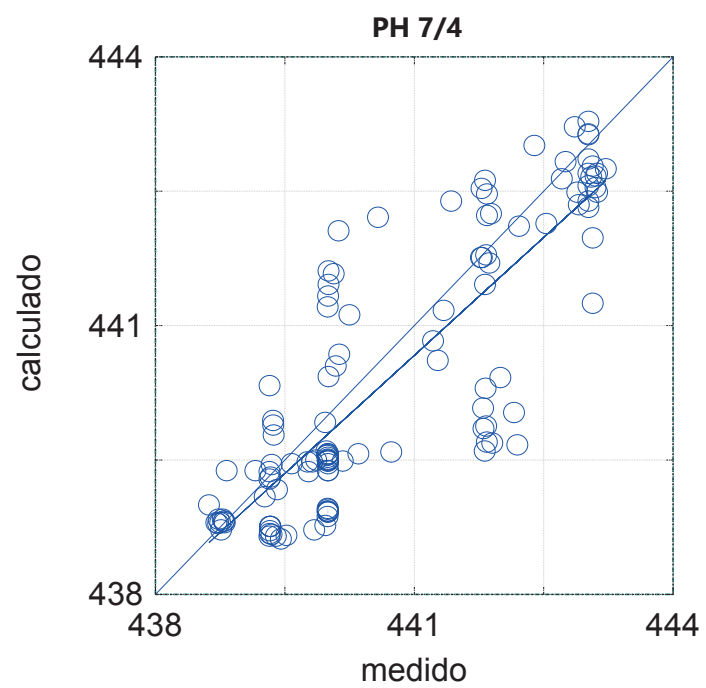




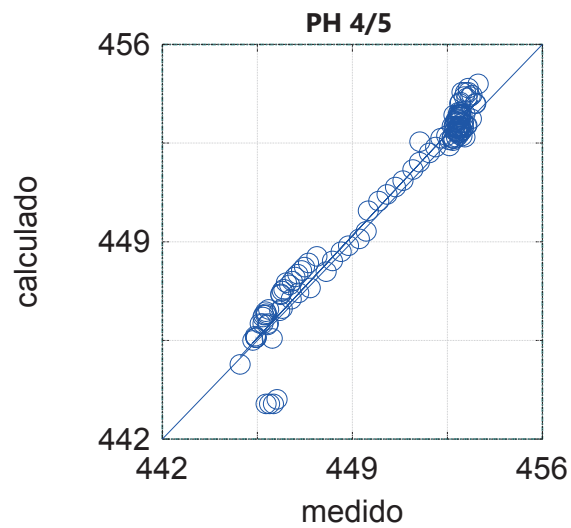
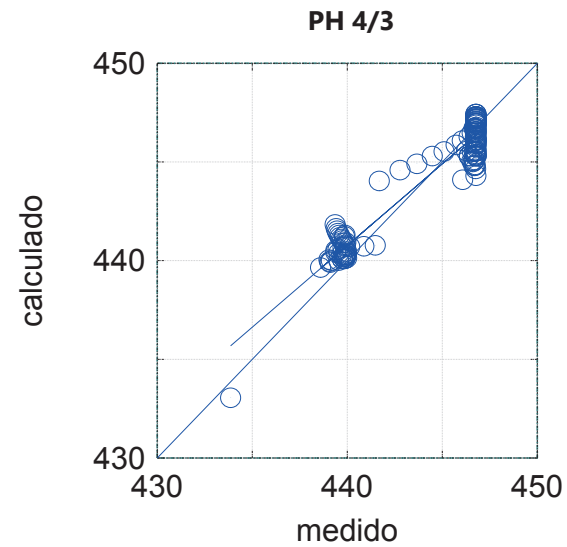
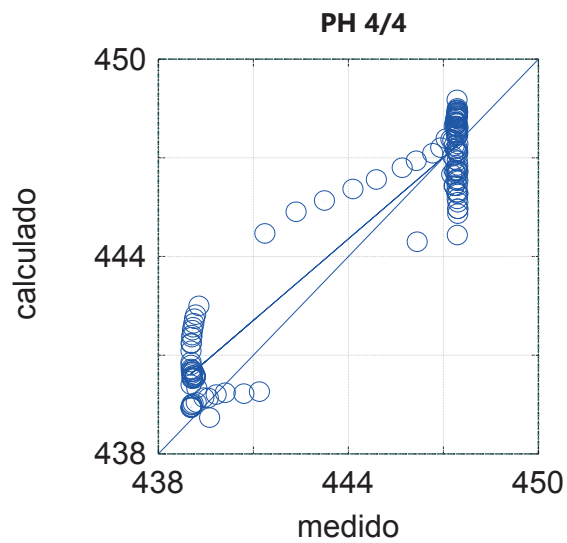
Piezómetros - FB até ao tratamento



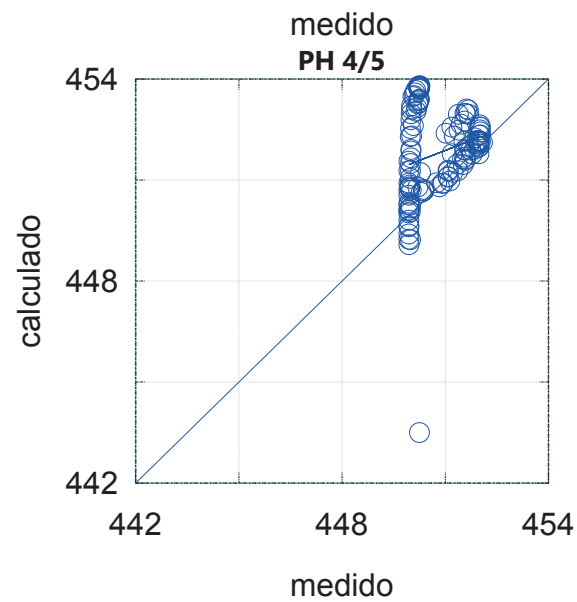
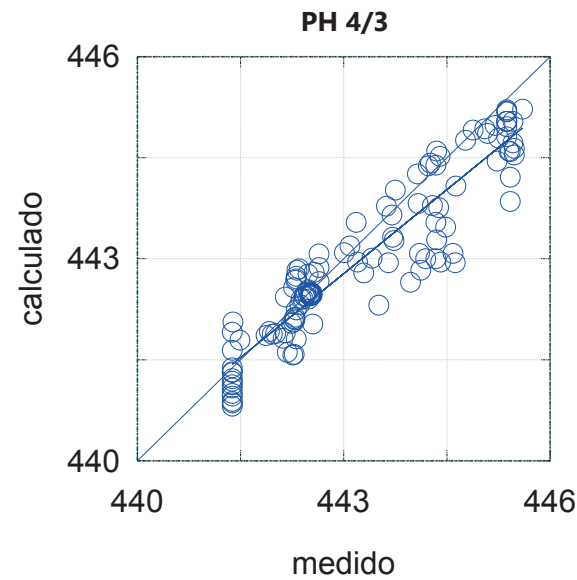
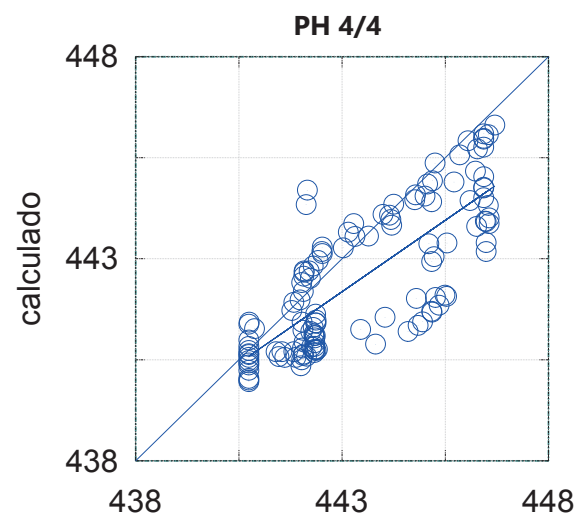
Piezómetros - FB após o tratamento



Piezômetros - FCJ até ao tratamento



Piezómetros - FCJ após o tratamento



Piezómetros - FCM

